



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

## MIKROKONTROLÉREM ŘÍZENÝ LABORATORNÍ ZDROJ

DIGITALLY CONTROLLED LABORATORY POWER SUPPLY

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petr Spáčil

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Zoltán Szabó, Ph.D.

BRNO 2019

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Mikroelektronika a technologie**

Ústav mikroelektroniky

**Student:** Petr Spáčil

**ID:** 191855

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2018/19

**NÁZEV TÉMATU:**

## Mikrokontrolérem řízený laboratorní zdroj

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte relevantní literaturu ohledně konstrukce stejnosměrných laboratorních zdrojů. Seznamte se s prací a programováním mikrokontrolérů a zaměřte se na mikrokontroléry od firmy Atmel. Podle získaných poznatků popište možné topologie laboratorních zdrojů, požadavky na ně a vyberte nejvhodnější řešení s ohledem na účinnost a rušení. Navrhněte zapojení laboratorního zdroje, který bude řízen pomocí mikrokontroléru. Měření a nastavené hodnoty napětí a proudu budou zobrazeny na LCD panelu. Navrhněte plošné spoje. Napište firmware pro řízení a ovládání zdroje. Zdroj realizujte a oživte, měřením jeho parametry ověřte.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

**Termín zadání:** 4.2.2019

**Termín odevzdání:** 30.5.2019

**Vedoucí práce:** Ing. Zoltán Szabó, Ph.D.

**Konzultant:**

**doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.**  
*předseda oborové rady*

### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce se zabývá rozdělením a řešením stejnosměrných zdrojů napětí. Popisuje jak zapojení zdrojů lineárních, tak zapojení zdrojů spínaných. Dále je blíže popsán 8bitový mikrokontrolér ATmega16 z rodiny mikrokontrolérů AVR firmy ATMEL. Hlavním cílem této bakalářské práce je návrh laboratorního zdroje 30V / 3A, který je v topologii spínané předregulace. Měření a zobrazování hodnot na displeji zajišťuje mikrokontrolér ATmega16.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Laboratorní zdroj, spínaný napájecí zdroj, mikrokontrolér, spínaná předregulace, ATmega16

## **ABSTRACT**

This bachelor thesis deals with the division and research of DC voltage sources. It also describes how linear and switch mode power supply works. The 8-bit ATmega16 microcontroller from the ATMEL family of AVR microcontrollers is further described. Part of this bachelor thesis is the desing of the laboratory power supply source 30V / 3A, which is in the topology of switched pre-regulation. The ATmega 16 microcontroller provides measurement and displaying values on the display.

## **KEYWORDS**

Laboratory power supply, Switch-mode power supply, microcontroler, switching preregulation, ATmega16

SPÁČIL, P. *Mikrokontrolérem řízený laboratorní zdroj*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2019. 66 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zoltán Szabó, Ph.D.

# Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „**Mikrokontrolérem řízený laboratorní zdroj**“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 30. května 2019

.....  
podpis autora

# Poděkování

Velice děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Z. Szabóovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování této bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat vedení FEKT VUT Brno za možnost využít laboratoř SC 2.83 k měření reálných parametrů.

V Brně dne 30. května 2019

.....  
podpis autora

# OBSAH

<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>6</b>
<b>Seznam tabulek.....</b>	<b>8</b>
<b>Seznam zkratek .....</b>	<b>9</b>
<b>Úvod.....</b>	<b>10</b>
<b>1 Lineární napájecí zdroje.....</b>	<b>11</b>
1.1 Transformátor .....	11
1.2 Usměrnovač .....	12
1.3 Stabilizátor.....	13
1.3.1 Parametrické stabilizátory .....	13
1.3.2 Teorie lineárních stabilizátorů.....	14
1.3.3 Porovnání lineárních a spínaných měničů.....	15
<b>2 Spínané zdroje napětí.....</b>	<b>16</b>
2.1 Spínané zdroje bez transformátoru (s indukčností) .....	17
2.1.1 Snižující měnič (buck) – step down .....	17
2.1.2 Zvyšující měnič (boost) – step up .....	17
2.1.3 Zvyšující a snižující měnič (cuk) .....	18
2.1.4 Invertující měnič .....	19
2.2 Jednočinné měniče s transformátory .....	20
2.2.1 Akumulující měnič – flyback .....	20
2.2.2 Propustný měnič - forward .....	21
2.2.3 Rezonanční měnič .....	23
2.3 Dvočinné měniče s transformátory.....	23
2.3.1 Měnič v zapojení push-pull .....	23
2.3.2 Měnič v zapojení polomost .....	24
2.3.3 Měnič v zapojení plný most .....	26
<b>3 Mikrokontroléry AVR .....</b>	<b>27</b>
3.1 ATmega16 .....	27
3.1.1 Vstupně-výstupní porty .....	28
3.1.2 Sériový kanál SPI .....	28
3.1.3 Interní A/D převodník .....	29
3.2 Programování mikrokontroléru .....	29

<b>4</b>	<b>Návrh zdroje.....</b>	<b>30</b>
4.1	Koncepce zdroje.....	30
4.2	Blokové schéma zdroje .....	31
4.3	Vstupní AC/DC měnič Mean-Well LRS 150-36 .....	33
4.4	Regulovatelný zdroj 30 V/ 3 A .....	34
4.5	Stabilizátor napětí 5 V .....	35
4.6	Měření a nastavení proudového omezení.....	35
4.7	Mikrokontrolér a periferie.....	36
4.8	Obvod zapínající výstup.....	37
<b>5</b>	<b>Firmware mikrokontroléru .....</b>	<b>38</b>
5.1	Základní popis programu mikrokontroléru .....	38
<b>6</b>	<b>Konstrukce zdroje.....</b>	<b>39</b>
<b>7</b>	<b>Měření charakteristik zdroje .....</b>	<b>41</b>
7.1	Měření charakteristik zdroje .....	41
7.2	Účinnost zdroje .....	41
7.3	Zvlnění výstupního svorkového napětí .....	45
7.4	Zatěžovací charakteristika zdroje.....	48
<b>8</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>50</b>
	<b>Literatura .....</b>	<b>51</b>
	<b>Seznam příloh.....</b>	<b>52</b>
<b>I.</b>	<b>Schémata zapojení .....</b>	<b>53</b>
<b>II.</b>	<b>Návrh DPS.....</b>	<b>56</b>
<b>III.</b>	<b>Průběhy výstupního zvlnění.....</b>	<b>58</b>
<b>IV.</b>	<b>Naměřené hodnoty .....</b>	<b>64</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.: Schémata usměrňovačů a zdvojovače. ....	12
Obrázek 2.: Schéma stabilizátoru se Zenerovou diodou. ....	13
Obrázek 3.: Základní zapojení lineárního zpětnovazebního stabilizátoru. ....	14
Obrázek 4.: Blokové schéma spínaného zdroje. ....	16
Obrázek 5.: Principiální zapojení snižujícího měniče. ....	17
Obrázek 6.: Principiální zapojení zvyšujícího měniče. ....	18
Obrázek 7.: První fáze činnosti měniče typu "cuk". ....	18
Obrázek 8.: Druhá fáze činnosti měniče typu "cuk". ....	19
Obrázek 9.: Topologie invertujícího měniče (sepnutý tranzistor Q). ....	19
Obrázek 10.: Topologie invertujícího měniče (rozeprnutý tranzistor Q). ....	20
Obrázek 11.: První fáze měniče typu flyback (tranzistor Q sepnutý). ....	20
Obrázek 12.: Druhá fáze činnosti měniče typu flyback (tranzistor Q rozeprnutý). ....	21
Obrázek 13.: Schéma propustného měniče - forward (tranzistor Q1 sepnut). ....	22
Obrázek 14.: Schéma propustného měniče - forward (tranzistor Q1 rozeprnut). ....	22
Obrázek 15.: Schéma rezonančního měniče. ....	23
Obrázek 16.: Schéma měniče v zapojení push-pull (tranzistor Q1 sepnut). ....	24
Obrázek 17.: Zapojení v polomostu se dvěma primárními vinutími. ....	25
Obrázek 18.: Zapojení v polomostu s jedním primárním vinutím. ....	26
Obrázek 19.: Zapojení měniče s plným mostem. ....	26
Obrázek 20.: Pinout mikrokontroléru ATmega16 v pouzdře PDIP. ....	27
Obrázek 21.: Programátor USBasp V2.0. ....	29
Obrázek 22.: Filtrace výstupního napětí předregulátoru. ....	30
Obrázek 23.: Návrh zapojení laboratorního zdroje. ....	31
Obrázek 24.: Testování čtyřřádkového displeje. ....	32
Obrázek 25.: Vstupní AC/DC měnič Mean-Well LRS 150-36. ....	33
Obrázek 26.: Zapojení stabilizátoru napětí LM7805. ....	35
Obrázek 27.: Zapojení operačního zesilovače pro proudové omezení. ....	36
Obrázek 28.: Schéma zapojení obvodu zapínající výstup. ....	37
Obrázek 29.: Vývojový diagram firmwaru mikrokontroléru. ....	38
Obrázek 30.: Přední panel regulovatelného zdroje. ....	39
Obrázek 31.: Vnitřní uspořádání regulovatelného zdroje. ....	40
Obrázek 32.: Schéma zapojení pro měření účinnosti laboratorního zdroje. ....	42
Obrázek 33.: Graf účinnosti laboratorního zdroje. ....	43
Obrázek 34.: Graf účinnosti laboratorního zdroje pro proudy od 0,5 A. ....	43
Obrázek 35.: Pracoviště pro měření parametrů v laboratoři. ....	44
Obrázek 36.: Schéma zapojení pro měření zvlnění výstupního svorkového napětí. ....	45
Obrázek 37.: Zvlnění výstupního napětí při $U_{\text{výstupní}} = 30 \text{ V}$ a $I_{\text{výstupní}} = 3 \text{ A}$ . ....	46
Obrázek 38.: Zvlnění výstupního napětí při proudovém omezení na $I_{\text{výstupní}} = 1 \text{ A}$ . ....	46
Obrázek 39.: Zvlnění výstupního napětí při $U_{\text{výstupní}} = 10 \text{ V}$ a $I_{\text{výstupní}} = 1 \text{ A}$ . ....	46
Obrázek 40.: Schéma zapojení pro měření zatěžovací charakteristiky zdroje. ....	48



Obrázek 41.: Zatěžovací charakteristika laboratorního zdroje .....	49
Obrázek 42.: Schéma zapojení laboratorního zdroje .....	53
Obrázek 43.: Schéma zapojení regulovatelného zdroje .....	54
Obrázek 44.: Zapojení mikrokontroléru s periferiemi .....	55
Obrázek 45.: Navržená DPS regulovatelného zdroje .....	56
Obrázek 46.: Předloha DPS pro leptání .....	57
Obrázek 47.: Průběh výstupního zvlnění při $U_{\text{výstupní}} = 10 \text{ V}$ a $I_{\text{výstupní}} = 1 \text{ A}$ .....	58
Obrázek 48.: Průběh výstupního zvlnění při $U_{\text{výstupní}} = 10 \text{ V}$ a $I_{\text{výstupní}} = 2 \text{ A}$ .....	58
Obrázek 49.: Průběh výstupního zvlnění při $U_{\text{výstupní}} = 10 \text{ V}$ a $I_{\text{výstupní}} = 3 \text{ A}$ .....	59
Obrázek 50.: Průběh výstupního zvlnění při $U_{\text{výstupní}} = 20 \text{ V}$ a $I_{\text{výstupní}} = 1 \text{ A}$ .....	59
Obrázek 51.: Průběh výstupního zvlnění při $U_{\text{výstupní}} = 20 \text{ V}$ a $I_{\text{výstupní}} = 2 \text{ A}$ .....	60
Obrázek 52.: Průběh výstupního zvlnění při $U_{\text{výstupní}} = 20 \text{ V}$ a $I_{\text{výstupní}} = 3 \text{ A}$ .....	60
Obrázek 53.: Průběh výstupního zvlnění při $U_{\text{výstupní}} = 30 \text{ V}$ a $I_{\text{výstupní}} = 1 \text{ A}$ .....	61
Obrázek 54.: Průběh výstupního zvlnění při $U_{\text{výstupní}} = 30 \text{ V}$ a $I_{\text{výstupní}} = 2 \text{ A}$ .....	61
Obrázek 55.: Průběh výstupního zvlnění při $U_{\text{výstupní}} = 30 \text{ V}$ a $I_{\text{výstupní}} = 3 \text{ A}$ .....	62
Obrázek 56.: Průběh výstupního zvlnění při proudovém omezení na 1 A. ....	62
Obrázek 57.: Průběh výstupního zvlnění při proudovém omezení na 2 A. ....	63

# SEZNAM TABULEK

Tabulka 1.: Srovnání parametrů spínaných a lineárních zdrojů .....	15
Tabulka 2.: Seznam přístrojů použitých při měření charakteristik zdroje .....	41
Tabulka 3.: Naměřené hodnoty zvlnění výstupního svorkového napětí. ....	45
Tabulka 4.: Tabulka naměřených hodnot při měření zatěžovací charakteristiky .....	64
Tabulka 5.: Tabulka naměřených hodnot účinnosti při výstupním napětí naprázdno 10 V .....	65
Tabulka 6.: Tabulka naměřených hodnot účinnosti při výstupním napětí naprázdno 20 V .....	65
Tabulka 7.: Tabulka naměřených hodnot účinnosti při výstupním napětí naprázdno 20 V .....	66

# SEZNAM ZKRATEK

AC – Střídavý proud

DC – Stejnoseměrný proud

VA – Voltampérová

A/D – Analog/Digital

D/A – Digital/Analog

PWM – Pulsně šířková modulace

SPI – Serial peripheral interface

LCD – Liquid crystal display

DPS – Deska plošných spojů

p-p – peak-to-peak hodnota (napětí špička-špička)

# ÚVOD

Cíl bakalářské práce je návrh laboratorního zdroje 30 V/ 3 A a rozbor teorie lineárních a spínaných zdrojů napětí, popis základních topologií těchto dvou typů a jejich srovnání. U lineárních a spínaných napájecích zdrojů popsat základní části, u zdrojů spínaných pak také funkci topologií měničů jak s cívkou, tak s transformátorem a doplnit je schémata.

Součástí práce je také stručné seznámení s 8bitovým mikrokontrolérem ATmega16 a jeho registry.

V rámci této bakalářské práce je jako hlavní cíl návrh laboratorního zdroje 30 V/ 3 A, řízeného mikrokontrolérem ATmega16. Zdroj má být navrhnout s ohledem na vysokou účinnost a nízké výstupní zvlnění.

# 1 LINEÁRNÍ NAPÁJECÍ ZDROJE

Cílem práce je navrhnout regulovatelný laboratorní zdroj. Historicky byly lineární zdroje dříve než zdroje spínané, které se začaly používat až na začátku 70. let 20. století. Jsou nejjednodušší z hlediska konstrukce. U lineárních napájecích zdrojů je regulace dosažena jedním nebo více polovodičovými prvky (bipolární tranzistor nebo MOSFET). Teorie lineárních stabilizátorů je popsána níže v následující kapitole.

Lineární zdroj je obvykle složen z několika základních bloků. Patří mezi ně vstupní filtr, transformátor, usměrňovač, filtr usměrněného napětí, regulátor a výstupní filtr.

## 1.1 Transformátor

Transformátor je elektrické zařízení, které přenáší energii mezi dvěma nebo více elektronickými obvody na základě elektromagnetické indukce. Sestává se ze dvou cívek na společném jádře, které může být např. feritové, železné nebo vzduchové. Protékající střídavý elektrický proud v jedné cívce (primární vinutí) transformátoru způsobuje měnící se magnetický tok  $\Phi$ , který prochází jádrem transformátoru a indukuje elektrické napětí v cívce druhé (sekundární vinutí). Elektrický výkon tak je přenášen mezi dvěma cívkami bez galvanického spojení. Transformátor je používán pro zvýšení nebo snížení střídavého napětí. [1]

$$p = \frac{N_P}{N_S} = \frac{U_P}{U_S} \quad (1.1)$$

Kde písmeno  $p$  je převod transformátoru,  $N_P$  je počet závitů na primárním vinutí,  $N_S$  je počet závitů na sekundárním vinutí,  $U_P$  je napětí na primárním vinutí a  $U_S$  napětí na vinutí sekundárním. V případě, že  $p > 1$  se jedná o transformátor zvyšující, při  $p < 1$  se jedná o transformátor snižující. Když  $p = 1$  a tedy počet závitů na primárním vinutí je shodný s počtem závitů na vinutí sekundárním, jedná se o transformátor oddělovací, kdy jediná jeho funkce je galvanické oddělení obvodů. [1]

Ideální transformátor je bezeztrátový. U reálného transformátoru se však vyskytují ztráty nakrátko (ztráty vinutí), které jsou způsobeny elektrickým odporem vodičů obou vinutí. Toto vinutí je při průchodu elektrického proudu zahříváno. Dále jsou zde ztráty naprázdno, což jsou ztráty v jádře transformátoru. Jsou složeny ze ztrát magnetizačních a ztrát vířivými proudy. Ztráty magnetizační vznikají v důsledku přemagnetování. Kolmo na směr magnetického toku  $\Phi$  může protékat zkratový vířivý proud, který je důsledkem těchto ztrát vířivými proudy. [3]

## 1.2 Usměrňovač

V oblasti napájecích zdrojů bylo ustáleno několik zapojení usměrňovačů podle požadavků na napětí, proud a zvlnění. Základní rozdělení:

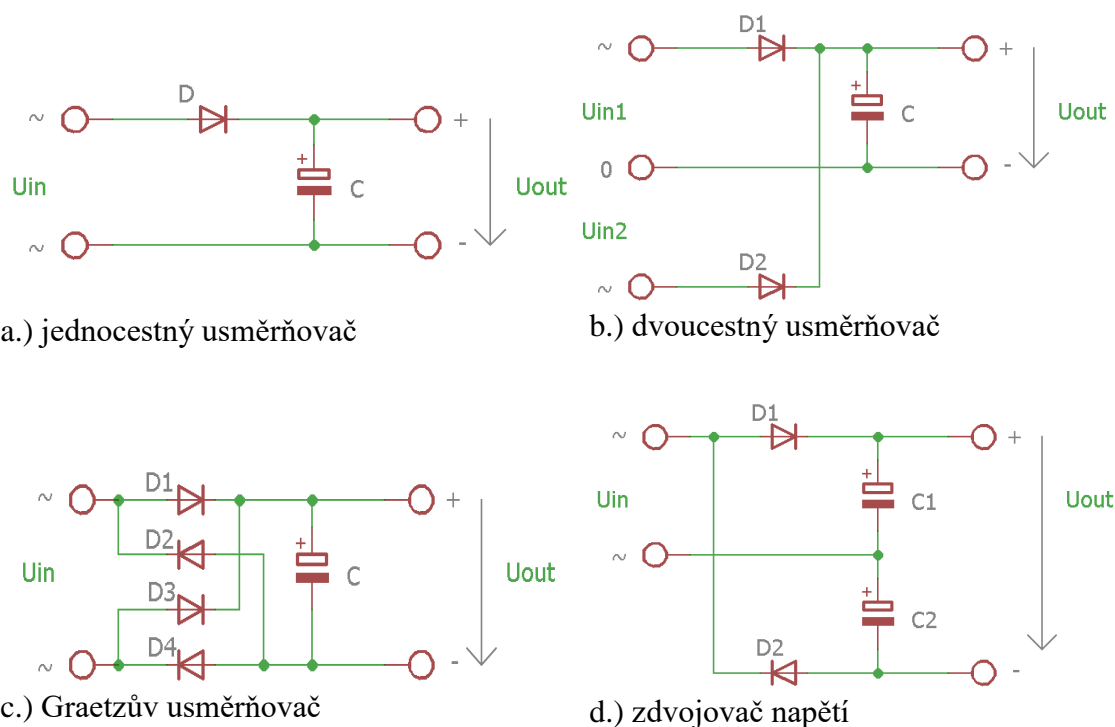
Pro síťový kmitočet 50 Hz:

- jednocestný usměrňovač (vysoká napětí, malé proudy, velké zvlnění)
- dvoucestný usměrňovač (nízká napětí, velké proud, malé zvlnění)
- Graetzův usměrňovač (můstkový) (střední napětí, velké proudy, malé zvlnění)
- zdvojovač (Greinacherův) (vysoká napětí, malé proudy, velké zvlnění)
- násobič (velmi vysoká napětí, velmi malé proudy, velké zvlnění)

Pro vyšší kmitočty (okolo 100 kHz):

- jednocestný (nízká napětí, vysoké proudy, malé zvlnění)
- dvoucestný (nízká napětí, velké proudy, malé zvlnění, omezuje stejnosměrné sycení jádra transformátoru)

Schémata jednocestného, dvoucestného, Graetzova usměrňovače a zdvojovače napětí lze vidět na obrázku obrázku (Obrázek 1).



Obrázek 1.: Schémata usměrňovačů a zdvojovače.

## 1.3 Stabilizátor

Stabilizátory jsou obvody, které jsou schopny stabilizovat výstupní napětí nebo proud při změnách výstupního proudu, výstupního napětí a okolní teploty. Na výstupní napětí může mít však vliv např. elektromagnetické rušení nebo stárnutí a opotřebení součástek. Stabilizátor má také tendenci snižovat střídavou složku výstupního napětí (pracuje jako filtr). [4]

### 1.3.1 Parametrické stabilizátory

Jejich funkce je založena na principu rozdílu mezi stejnosměrným odporem a dynamickým odporem stabilizačního prvku v pracovním bodě. O parametrický stabilizátor napětí se jedná v případě, že je dynamický odpor v pracovním bodě nižší než odpor stejnosměrný (dioda v propustném směru, Zenerova dioda). O parametrický stabilizátor proudu se jedná, když naopak dynamický odpor v pracovním bodě je vyšší než odpor stejnosměrný (výstupní charakteristika tranzistoru za kolenem). [1]

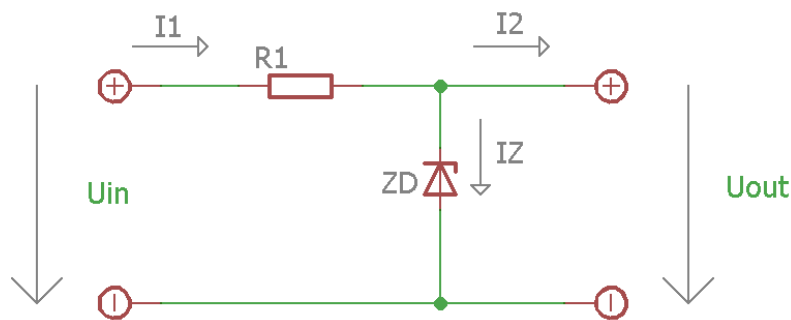
Jedním ze základních parametrických stabilizátorů je stabilizátor se Zenerovou diodou. Schéma stabilizátoru lze vidět na obrázku (Obrázek 2).

U stabilizátoru se Zenerovou diodou se využívá jevu, kdy v závěrném směru dochází k rychlému nárůstu proudu při pomalém nárůstu napětí. Toto napětí je nazýváno Zenerovo napětí a tento děj je způsoben Zenerovým jevem nebo při vyšších hodnotách napětí jevem lavinovým.

Pro správnou stabilizaci je třeba taková Zenerova dioda, která má minimální teplotní závislost, to je  $\alpha_{TKUZ} = 0 \text{ mV/K}$ . Diodu s touto teplotní závislostí lze najít se Zenerovým napětím kolem 6 V.

Další varianta je použít Zenerovu diodu s teplotním koeficientem  $\alpha_{TKUZ} = -2 \text{ mV/K}$  a k ní do série připojit propustně polarizovanou křemíkovou usměrňovací diodu, která má teplotní koeficient  $\alpha_{TK} = -2 \text{ mV/K}$ . Tím se teplotní závislosti vykompenzují.

Stabilizátor s touto diodou pracuje tak, že při zvyšování vstupního napájecího napětí  $U_{IN}$  až na hodnotu Zenerova napětí  $U_{ZD}$  se pracovní bod dostává do kolena ve VA charakteristice a velice rychle klesá její odpor. Vstupní proud  $I_1$  se rozděluje na proud Zenerovou diodou  $I_Z$  a proud do zátěže  $I_2$ . Při nárůstu proudu se potom napětí zvyšuje minimálně. [1]

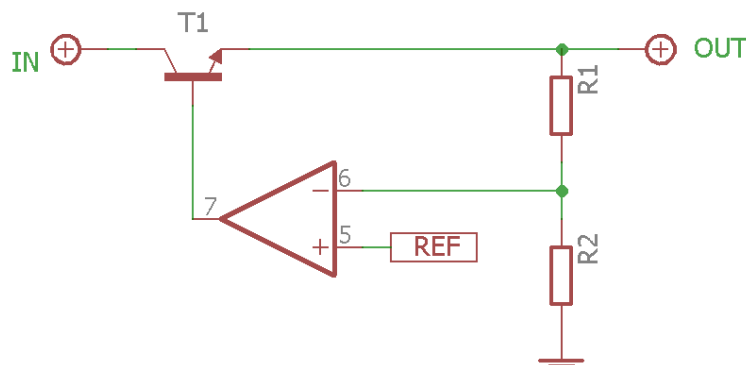


Obrázek 2.: Schéma stabilizátoru se Zenerovou diodou.

### 1.3.2 Teorie lineárních stabilizátorů

Integrovaný stabilizátor napětí se sestává ze stabilní napěťové reference a zesilovače regulační odchylky, který disponuje vysokým zesílením. Napěťová reference má přirozeně tu vlastnost, že její napětí je stabilní a vliv změny teploty přechodů a změn napájecího napětí je podstatně menší, než je vliv hodnoty referenčního napětí. Stabilizátor se snaží na výstupu držet konstantní napětí při změnách napětí vstupního. Ideální stabilizátor napětí je konstantní zdroj napětí s nulovým vnitřním odporem. V praxi je však odpor zdroje nenulový. [4]

Základem lineárního zpětnovazebního stabilizátoru napětí na obrázku (Obrázek 3). je NPN tranzistor v zapojení emitorového sledovače, operační zesilovač, zdroj referenčního napětí a zpětnovazební dělič napětí. Funguje tak, že operační zesilovač se zápornou zpětnou vazbou má za snahu udržet na obou vstupech shodná napětí. Porovnává tedy výstupní napětí (na děliči) s napěťovou referencí. Podle potřeby tedy otevírá a přivírá NPN tranzistor  $T_1$ . V případě, že výstupní napětí klesne (vyšší zátěž), tranzistor  $T_1$  je vybuzen větším napětím, otevře se a výstupní napětí se tak zvýší. Stabilizátor lze realizovat tak, že jako zesilovač odchylky se použije další NPN tranzistor, kde do báze povede napětí z výstupního děliče, v emitoru bude připojena Zenerova dioda jako napěťová reference a kolektor přes odpor do báze tranzistoru  $T_1$ .



Obrázek 3.: Základní zapojení lineárního zpětnovazebního stabilizátoru.



### 1.3.3 Porovnání lineárních a spínaných měničů

Jsou dvě základní metody konverze napětí. U lineární regulace je regulační charakteristika dosažena jedním nebo více polovodičovými prvky (bipolární tranzistor nebo MOSFET), které jsou provozovány v lineární oblasti výstupní VA charakteristiky.

Lineární regulátory mají výhodu ve své jednoduchosti (minimum použitých okolních součástek), nízkém výstupním zvlnění a jednoduché možnosti regulace výstupního napětí. Mezi jejich nevýhody však patří nízká účinnost (s čímž je spojena obvykle nutnost použití chladičů), větší rozměry a hmotnost, neizolovaný vstup od výstupu a nemožnost konverze nahoru (tj vstupní napětí musí být vždy vyšší nebo stejné jako výstupní). I v případě nízké účinnosti se však často pro snížení napětí tam, kde rozdíl vstupního a výstupního napětí je několik Voltů nebo při nízkém odběru proudu. [4]

Na rozdíl od lineární regulace, u spínaných měničů je napěťové konverze dosaženo přepínáním jedné nebo více polovodičových součástek co nejrychleji mezi jejich sepnutým a rozepnutým stavem, kdy tranzistor je plně otevřen nebo plně uzavřen.

Mezi hlavní výhody spínaných zdrojů patří možnost konverze nahoru, vysoká účinnost, která dnes dosahuje 70 až 98 %, což zvyšuje jejich použitelnost v nízkopříkonových aplikacích a také nižší nároky na chlazení (rozměry chladiče). Účinnost se podstatně zlepšuje při dosažení spínací kmitočtu okolo 20 kHz. Dále jejich váha a rozměry jsou menší než zdroje lineární. Nevýhodou je však jejich obecně složitější a komplikovanější návrh, a to hlavně z hlediska vysoké pracovní frekvence jednotlivých součástek, které musí na vysokých kmitočtech spolehlivě pracovat (mezní kmitočty tranzistorů a diod, rozptylové kapacity transformátorů a stejnosměrné odpory elektrolytických kondenzátorů). Další nevýhodou je zvlnění výstupního napětí a proudu díky rychlému spínání spínacích tranzistorů. Parametry spínaných zdrojů se postupně s klesající cenou použitých součástek zhoršují. Celkové srovnání lineárních a spínaných zdrojů lze vidět v tabulce (Tabulka 1).[4]

*Tabulka 1.: Srovnání parametrů spínaných a lineárních zdrojů*

parametr	spínaný zdroj	lineární zdroj
účinnost	75 %	30 %
velikost	0,2 W/cm <sup>3</sup>	0,05 W/cm <sup>3</sup>
váha	100 W/kg	20 W/kg
výstupní zvlnění	50 mV	5 mV
šumové napětí	200 mV	50 mV
odezva na skok	1 ms	20 μs
doba náběhu	20 ms	2 ms
cena	přibližně konstantní	roste s výkonem

## 2 SPÍNANÉ ZDROJE NAPĚTÍ

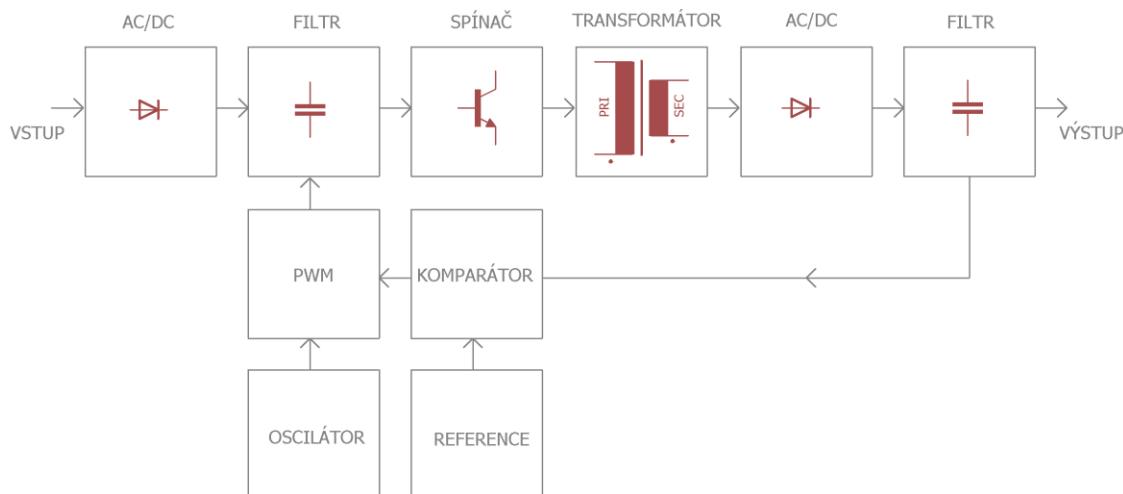
Základní princip spínaných zdrojů je podobný jako u zdrojů lineárních s tím rozdílem, že spínací tranzistor může být jen ve dvou stavech – sepnutý nebo rozepnutý. Základní topologie spínaných zdrojů je naznačena na obrázku (Obrázek 4). Výstupní napětí je pomocí operačního zesilovače porovnáváno s napětíovou referencí a následně je spínací tranzistor spínán nebo rozepínán.

Spínaný zdroj se skládá z několika základních částí. Ne vždy obsahuje všechny (výstupní filtr) a často obsahuje i některé navíc (vstupní usměrňovač). Podmínkou činnosti spínaného zdroje je stejnosměrné vstupní napětí, pokud možno co nejvíce zbavené střídavé složky.

V případě, že vstupní napětí je stejnosměrné, není náročnost na vstupní filtr vysoká. Je-li však vstupní napětí střídavé (sítové napětí frekvence 50 Hz), je potřeba ho usměrnit a po usměrnění důkladně vyhladit zbytkové zvlnění napětí vstupním filtrem. Na takto nízkém kmitočtu není třeba klást vysoké nároky na usměrňovací diody, zatímco vstupní filtr musí mít dostatečné parametry. [1]

Pro transformování vstupního napětí je potřeba toto napětí nejprve převést na střídavý tvar. Toho je dosaženo vysokofrekvenčních spínacích tranzistorů – bipolárních pro frekvence do 200 kHz nebo FET tranzistorů pro frekvence do 3 MHz. Tyto spínací tranzistory ze stejnosměrného napětí spínáním a rozpínáním vytvoří obdélníkový průběh napětí.

Transformace velikosti napětí probíhá na indukčnosti nebo transformátoru. Střídavé napětí za tranzistorem je potřeba usměrnit a dostatečně vyfiltrovat jeho střídavé složky. Přitom naopak vzhledem ke vstupním obvodům jsou vysoké požadavky kladeny na usměrňovací diody, které musí správně usměrňovat průběh napětí na pracovním kmitočtu. Tyto diody by měly mít malou kapacitu přechodu a malou spínací a hlavně vypínací dobu. Na výstupní filtr již takové nároky jako na filtr vstupní nejsou. Filtrační účinky filtru na vysokém kmitočtu jsou vynikající. [1]



Obrázek 4.: Blokové schéma spínaného zdroje.

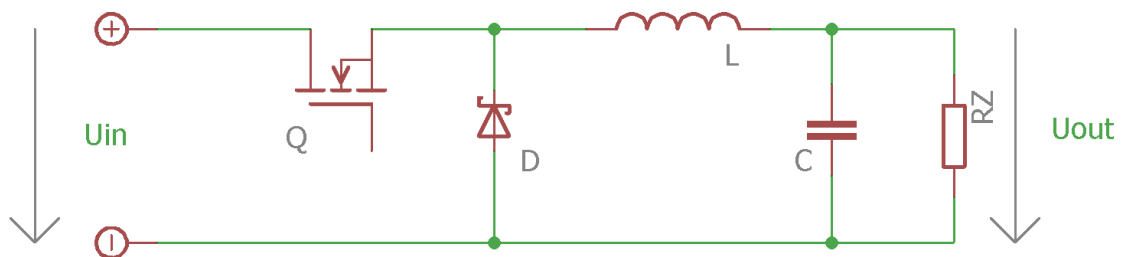
## 2.1 Spínané zdroje bez transformátoru (s indukčností)

Spínané zdroj bez transformátoru jsou jednou ze dvou skupin spínaných zdrojů. Jako akumulační prvek je zde použita jedna nebo více cívek, které však nejsou na společném jádře a nepracují tedy jako transformátor. U těchto typů spínaných zdrojů není vstupní a výstupní napětí galvanicky izolováno. V případě potřeby vyšších výkonů jsou však rozměry cívky příliš velké a je tak nutno užít transformátor. Mezi tyto zdroje patří měnič buck, boost, cuk (buck-boost) a měnič invertující.

### 2.1.1 Snižující měnič (buck) – step down

Na obrázku (Obrázek 5). Lze vidět principiální zapojení snižujícího měniče. Jedná se o neizolovaný měnič dolů. Během sepnutí tranzistoru  $Q$  je proud veden z napájecího zdroje a cívku  $L$  do zátěže. Během rozepnutí tranzistoru  $Q$  se cívka  $L$  stává zdrojem napětí a proud se do zátěže uzavírá přes diodu  $D$ . V případě sepnutého tranzistoru  $Q$  výstupní napětí roste, roste i napětí na kondenzátoru  $C$  a ten se nabíjí. V případě rozepnutí tranzistoru  $Q$  se změni polarita proudu kondenzátorem, ten se vybíjí do zátěže a přičítá se k proudu tekoucího z cívky do zátěže, čímž se zmenšuje výstupní zvlnění. [4]

Výhodou zapojení je nízká cena a jednoduchost. Nevýhody spočívají v omezení rozsahu výkonů a galvanickém spojení vstupu a výstupu. Při zkratu výstupu může dojít k nenávratnému zničení tranzistoru  $Q$ . Střída je měnitelná od 0 do 100 %. [4]



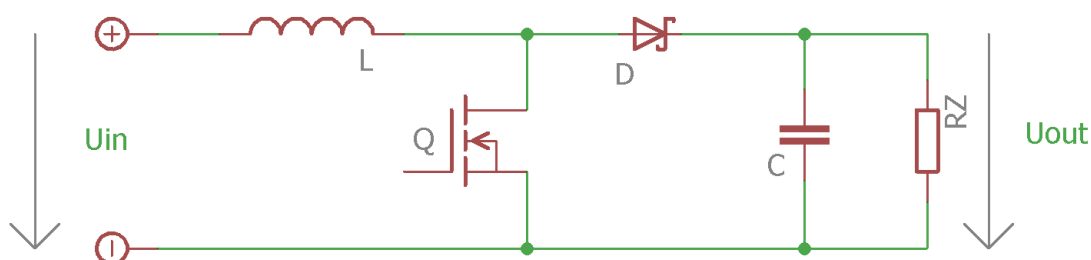
Obrázek 5.: Principiální zapojení snižujícího měniče.

### 2.1.2 Zvyšující měnič (boost) – step up

Jedná se o neizolovaný měnič nahoru (zvyšující). Zvyšující měnič lze vidět na obrázku (Obrázek 6). Výstupní napětí může být pouze vyšší než je napětí vstupní. Lze také tento měnič považovat za nepřímý měnič energie. Je totiž akumulována v magnetickém poli cívky.

Během sepnutí tranzistoru  $Q$  roste proud cívku a obvod se uzavírá přes sepnutý tranzistor. Energie je akumulována v mag. poli cívky a ta se jeví jako spotřebič. Během rozepnutí tranzistoru  $Q$  proud protéká ze vstupního zdroje napětí přes cívku a diodu  $D$  až do zátěže, ale část proudu teče do kondenzátorem  $C$  a ten se nabíjí. V tomto případě se cívka jeví jako zdroj a je spojena se vstupním zdrojem v sérii. Naindukované napětí na cívkce  $L$  se sčítá se vstupním napětím, dioda  $D$  přejde do vodivého stavu. Dioda  $D$  ve fázi sepnutého tranzistoru  $Q$  zabraňuje vybíjení kondenzátoru  $C$  přes tranzistor  $Q$ .

Mezi výhody patří nízká cena, jednoduchost a možnost dosáhnout výstupního napětí vyššího než vstupního bez užití transformátoru. Při nízkých hodnotách střidy je však poměrně vysoké výstupní zvlnění. [4]

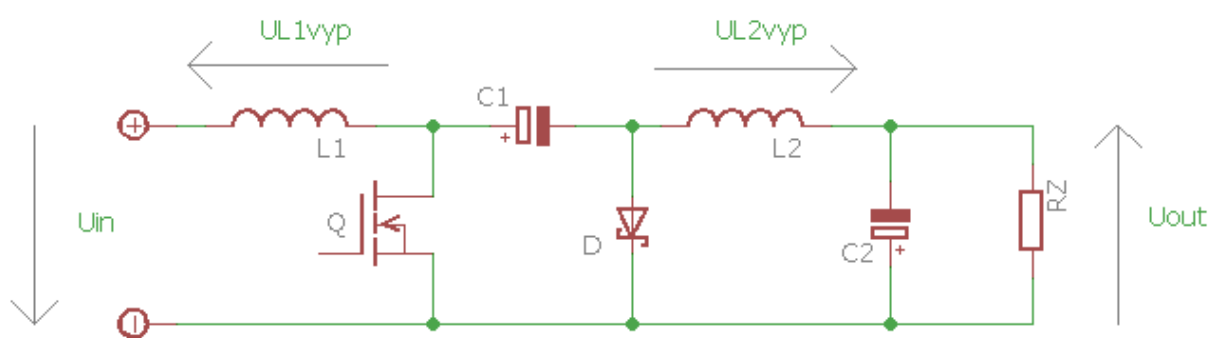


Obrázek 6.: Principiální zapojení zvyšujícího měniče.

### 2.1.3 Zvyšující a snižující měnič (cuk)

V literatuře je označení „cuk“ užíváno pro takové měniče, jenž dokáží výstupní napětí zvyšovat i snižovat, respektive na svém výstupu dokáží udržovat konstantní napětí v případě, že vstupní napětí je vyšší nebo nižší než napětí výstupní. Výstupní napětí je opačné polarity než napětí vstupní. Činnost měniče je ilustrována na obrázcích (Obrázek 7 a Obrázek 8).

Jedná se o neizolovaný a nepřímý měnič. V první fázi je tranzistor  $Q$  rozeptný, teče proud za vstupního zdroje v sérii s cívkou  $L_1$  (chová se jako zdroj) přes kondenzátor  $C_1$ , diodu  $D$  a uzavírá se opět do vstupního zdroje. Kondenzátor  $C_1$  je nabíjen na napětí  $U_{IN} + U_{L1vyp}$  nebo menší, které je určeno dobou do sepnutí tranzistoru  $Q$ . Energie magnetického pole cívky  $L_1$  klesá, s ní i hodnota proudu, který jí protéká. V případě, že by interval rozeptnutí tranzistoru  $Q$  byl dostatečně dlouhý, nabitý kondenzátor  $C_1$  by se začal vybíjet přes cívku  $L_1$  do vstupního zdroje. Tomu by se mělo správným časováním spínání tranzistoru  $Q$  zabránit. [4]

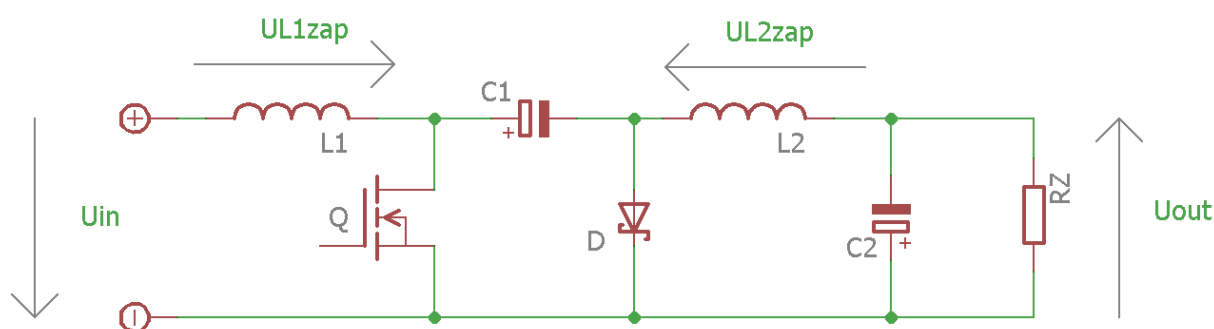


Obrázek 7.: První fáze činnosti měniče typu "cuk".

V druhé fázi je tranzistor  $Q$  sepnut. Jakmile je sepnut, začne proud protékat ze vstupního zdroje cívku  $L_1$  a přes sepnutý tranzistor  $Q$  opět do zdroje a hodnota proudu cívku se zvyšuje. Také je kladný pól kondenzátoru  $C_1$  spojen se zemí a může se vybíjet. Kondenzátor  $C_1$  se vybíjí, kondenzátor  $C_2$  se nabíjí a na cívce  $L_2$  je napětí  $U_{L2zap}$ , které vzniklo procházejícím proudem při současném ukládání energie do jejího mag. pole. [4]

Ve třetí části je opět tranzistor  $Q_1$  rozeprt a opětovně probíhá část první s tím rozdílem, že v mag. poli cívky  $L_2$  je uložena energie, která při rozeprtí tranzistoru  $Q_1$  má tendenci neměnit směr proudu při otáčení polarity napětí na této cívce a tento proud protéká přes diodu  $D_1$  a zatěžovací odpor  $R_Z$  zpět do cívky.

Tento typ měniče je užíván v případech při napájení z akumulátoru, kdy napětí toho akumulátoru je nejdřív vyšší než požadované výstupní napětí a poté nižší. Nejprve tedy měnič pracuje jako snižující a při vybitém akumulátoru jako měnič zvyšující. [4]

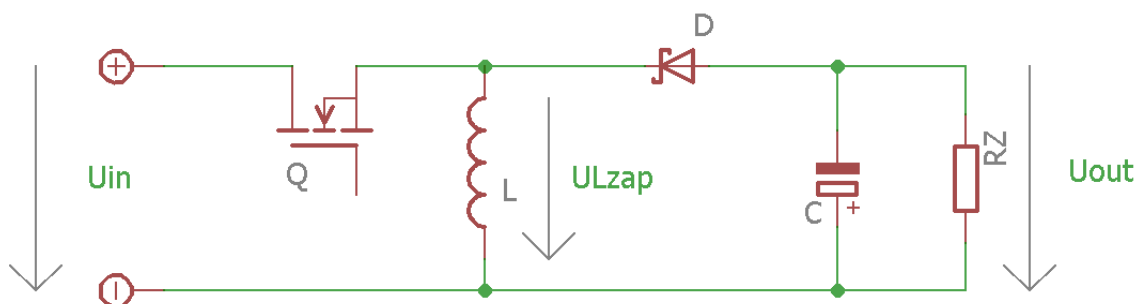


Obrázek 8.: Druhá fáze činnosti měniče typu "cuk".

## 2.1.4 Invertující měnič

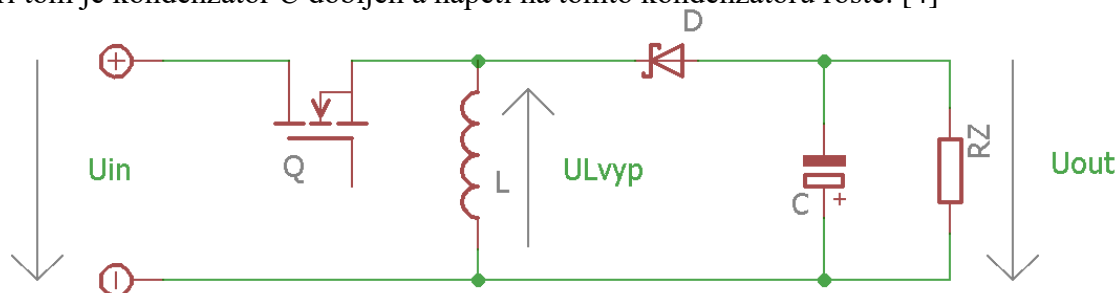
Tento typ měniče má tu vlastnost, že mění polaritu výstupního napětí oproti vstupnímu. Tuto vlastnost má i měnič topologie „cuk“, u kterého však obrácení polarity vyplynulo z jiného důvodu než z potřeby inverze. Invertující zapojení měniče je tedy realizovatelné jednodušeji.

Invertující měnič opět pracuje ve dvou fázích spínání tranzistoru  $Q$ . Během sepnutí tranzistoru  $Q$  (Obrázek 9.) proud začne protékat ze vstupního zdroje přes cívku  $L$  a uzavírá se opět do vstupního zdroje. Tento proud  $I_{Lzap}$  lineárně roste kvůli konstantnímu napětí vstupního zdroje a jeho orientace je stejná jako napětí na cívce  $U_{Lzap}$ , protože se v této části chová jako spotřebič. Proud do zátěže je kryt úbytkem náboje na kondenzátoru  $C$  a výstupní napětí  $U_{OUT}$  klesá. [4]



Obrázek 9.: Topologie invertujícího měniče (sepnutý tranzistor  $Q$ ).

V druhé fázi, když tranzistor  $Q$  je rozepnutý (Obrázek 10.), se cívka  $L$  mění ze spotřebiče na zdroj, proud teče stejným směrem, ale napětí na cívce má obrácenou polaritu. Tím se otevře dioda  $D$  a proud pak protéká z cívky  $L$  přes diodu  $D$ , zátěž  $R_Z$  a opět přes cívku  $L$ . Při tom je kondenzátor  $C$  dobíjen a napětí na tomto kondenzátoru roste. [4]



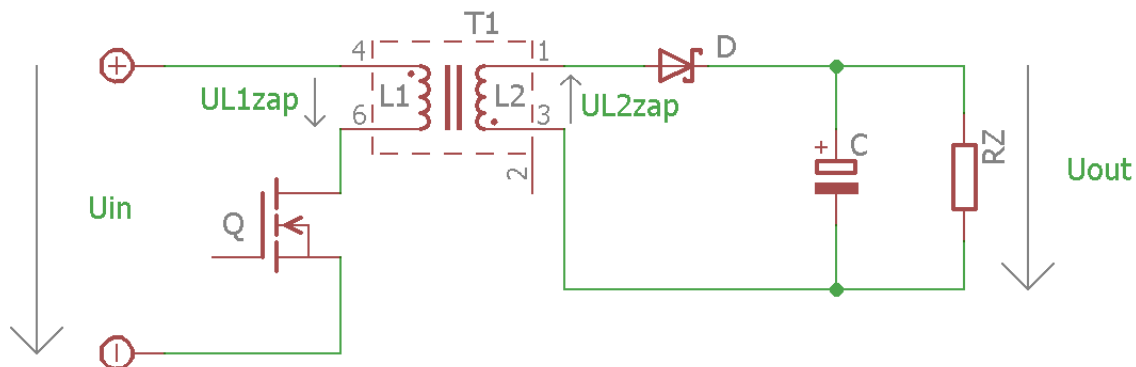
Obrázek 10.: Topologie invertujícího měniče (rozepnutý tranzistor  $Q$ ).

## 2.2 Jednočinné měniče s transformátory

Měniče s transformátory jsou využívány v případě, že požadujeme galvanické oddělení vstupního napětí od výstupního napětí nebo také v případě, že požadujeme vícero výstupních napětí než jedno a navzájem galvanicky odděleny. K řešení měniče s transformátorem se přistupuje také v případě, kdy rostou požadavky na výstupní výkon a při použití zapojení s cívkou by tato cívka byla příliš rozměrná. [4]

### 2.2.1 Akumulující měnič – flyback

Toto zapojení akumulujícího měniče pracuje v režimu, kdy přenáší energii ze vstupu na výstup. Během sepnutí tranzistoru  $Q$  (Obrázek 11.) proud protéká ze vstupního zdroje do primární cívky  $L_1$  transformátoru  $T_1$  a přes sepnutý tranzistor  $Q$  zpět do zdroje. Proud cívkou  $L_1$  lineárně roste, vyvolává lineární změnu magnetického toku v jádře transformátoru (ze předpokladu, že však jádro není přesyceno) a tato lineární změna magnetického toku v jádře indukuje do sekundární cívky  $L_2$  konstantní napětí. Vzhledem k polaritě začátků vinutí transformátoru k diodě  $D$  je tato dioda polarizována závěrně, proud přes ní neprotéká a nemůže být tak na sekundární straně transformátoru odebrána energie. Napětí výstupního kondenzátoru  $C$  klesá a ten se vybíjí do zátěže. [4]

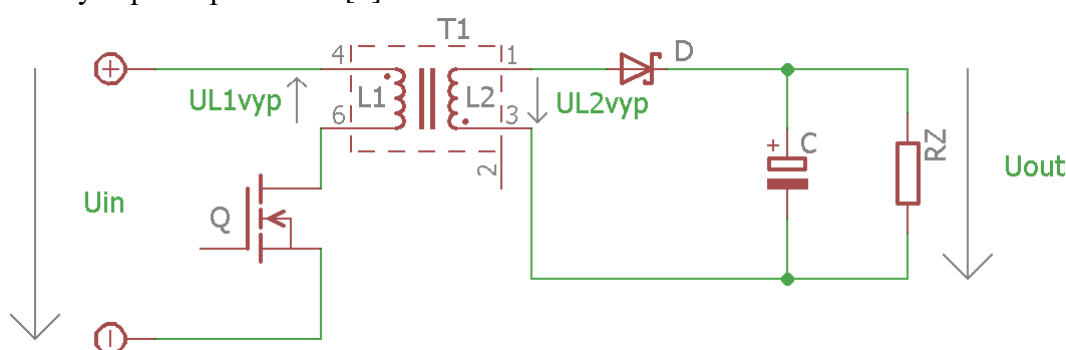


Obrázek 11.: První fáze měniče typu flyback (tranzistor  $Q$  sepnutý).

Energie je v této části činnosti měniče akumulována do mag. pole cívky  $L_1$ . Množství energie  $W_{Tr}$ , které je lze do transformátoru v jednom spínacím cyklu akumulovat udává přibližně objem mag. materiálu transformátoru. Toto množství energie a objem magnetického materiálu také souvisí s výkonem do zátěže  $P_{OUT}$  a se spínací frekvencí tranzistoru  $Q$  vztahem:

$$W_{Tr} = \frac{P_{OUT}}{f_s} \left[ W; \frac{W}{s}; Hz \right] \quad (2.1)$$

Během druhé fáze spínacího cyklu, kdy tranzistor  $Q$  je rozepnut (Obrázek 12.) se skokově mění polarita napětí na primární cívce  $L_1$  i napětí na sekundární cívce  $L_2$ . Opačná polarita napětí na sekundární cívce  $L_2$  má za následek to, že dioda  $D$  je v tomto stavu polarizována v propustném směru a začíná jí protékat proud do zátěže  $R_Z$  a kondenzátoru  $C$ , který je dobíjen a výstupní napětí roste. [4]



Obrázek 12.: Druhá fáze činnosti měniče typu flyback (tranzistor  $Q$  rozepnutý).

Zapojení tohoto měniče s transformátorem je jedno z nejlevnějších a nejjednodušších v případě, že je potřeba galvanicky oddělit primární a sekundární stranu. Při potřebě získat více výstupních napětí lze použít transformátor s více sekundárními vinutími. Transformátor lze navrhnout podle následujícího vztahu:

$$U_{L1vyp} = U_{IN} + \left( \frac{N_2}{N_1} \right) * U_{OUT} \quad (2.2)$$

kde počet závitů primární cívky  $L_1$  transformátoru  $T_1$  je  $N_1$  a počet závitů sekundární cívky  $L_2$  transformátoru  $T_1$  je  $N_2$ . Zapojení tohoto typu měniče se používá pro výkony do 150 W. [4]

### 2.2.2 Propustný měnič - forward

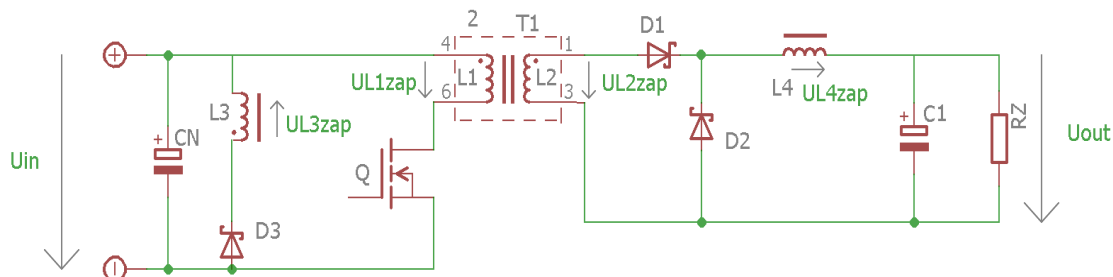
Tento typ měniče je založen na opačném principu transformátoru. Pracuje v propustném režimu. Během sepnutí tranzistoru  $Q$  je energie odebírána ze sekundární cívky  $L_2$ . Tato energie je odebírána ve stejný moment, ve který je do primární cívky  $L_1$  energie dodávána ze vstupního zdroje. Oproti akumulárnímu měniči má následující odlišnosti:

- Transformátor může mít menší rozměry
- Po vypnutí tranzistoru  $Q$  není z transformátoru odebírána energie a jestliže v něm nějaká energie zůstala, roste napětí na primární cívkce  $L_1$  a ohrožuje rozepnutý tranzistor  $Q$ . Ten musí být chráněn ochrannými obvody nebo pro lepší účinnost rekuperačním vinutím  $L_3$
- Výpočet transformátoru je značně složitý kvůli nelineárnosti průběhu předávání energie v čase

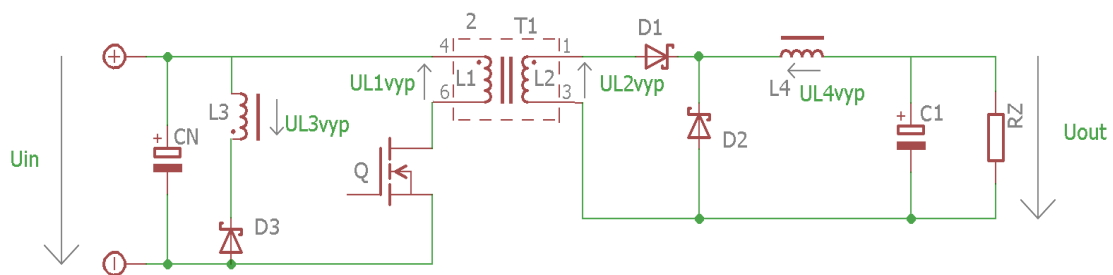
Měnič je izolovaná verze snižujícího (buck) měniče a může být provozováno na vyšší výkony. Při použití transformátoru  $T_1$  je sekundární obvod galvanicky oddělen od obvodu primárního. Tento měnič je možné provozovat jako zvyšující i snižující měnič, přičemž převládá používání tohoto typu měniče jako snižující. Nárazová tlumivka  $L_4$  společně s kondenzátorem  $C_1$  tvoří LC filtr. Dvě fáze činnosti tohoto měniče lze vidět na obrázcích (Obrázek 13 a Obrázek 14).

Během sepnutí tranzistoru  $Q$  teče jeden proud ze vstupního zdroje  $U_{IN}$  přes primární cívkku  $L_1$  a tranzistor  $Q$  zpět do vstupního zdroje. Začátky primární vinutí  $L_1$  a sekundární vinutí  $L_2$  transformátoru  $T_1$  jsou orientovány shodně, tudíž napětí na těchto cívkách mají shodnou orientaci. V této fázi je dioda  $D_1$  polarizována v propustném směru a umožňuje průchod proudu ze sekundárního vinutí  $L_2$  přes diodu  $D_1$  a tlumivku  $L_4$ , který nabíjí kondenzátor  $C$  a zároveň teče do zátěže. Cívka  $L_4$  se chová jako spotřebič a její proud má stejnou orientaci jako napětí na této tlumivce.

Jakmile se tranzistor  $Q$  rozeprne, na všech cívkách transformátoru  $T_1$  se změní polarita napětí. Ze sekundární cívkky  $L_2$  v tuto chvíli již nemůže protékat proud diodou  $D_1$ . Ta je v této fázi namáhána inverzním napětím. Proudový obvod tlumivkou  $L_4$  je přerušen a z této tlumivky se stává zdroj a přechází přes ni proud před zátěž a zároveň se sčítá s proudem kondenzátoru  $C$ . Výstupní napětí  $U_{OUT}$  v této fázi klesá. [4]



Obrázek 13.: Schéma propustného měniče - forward (tranzistor  $Q1$  sepnut).



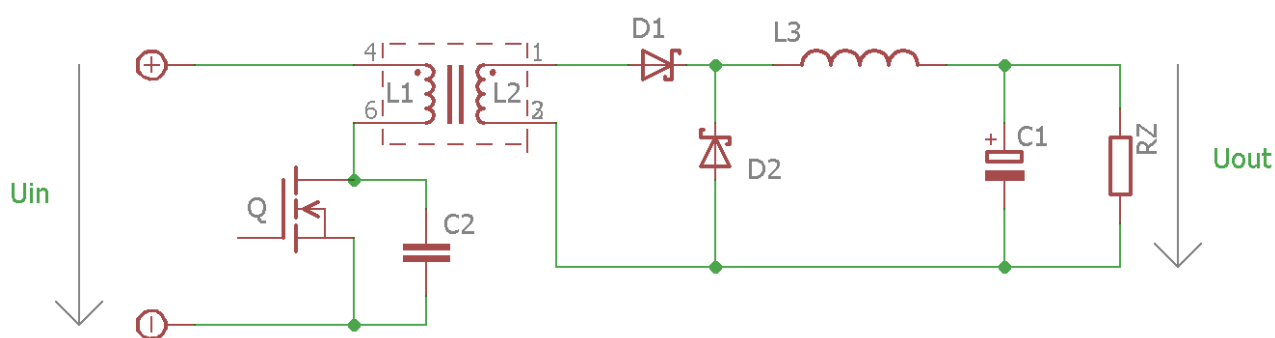
Obrázek 14.: Schéma propustného měniče - forward (tranzistor  $Q1$  rozepnut).



### 2.2.3 Rezonanční měnič

Tento typ měniče na obrázku (Obrázek 15) je v podstatě zapojení propustného měniče s tím rozdílem, že paralelně k tranzistoru  $Q$  je připojen kondenzátor  $C_2$ . Kapacita tohoto kondenzátoru je volena s ohledem na další parazitní kapacity v obvodu (kapacita drain-source tranzistoru, parazitní kapacita cívky  $L_1$  a parazitní kapacita spojů). Účelem této kapacity  $C_2$  je vytvoření rezonančního obvodu společně s cívkou  $L_1$ . Rezonanční kmitočet tohoto rezonančního obvodu by měl být volen v souvislosti se spínací frekvencí tranzistoru tak, aby při skokovém spínání tranzistoru měly obvodové veličiny spojitý průběhy. [4]

Ve výsledku toto zapojení je vyšší účinnost měniče a snižování rušení. Návrh je však komplexní a kapacita kondenzátoru  $C_2$  může být často volena až při montáži do skutečného obvodu na DPS. Zapojení měniče je používáno pro menší výkony do 40 W. [4]



Obrázek 15.: Schéma rezonančního měniče.

## 2.3 Dvojčinné měniče s transformátory

Tyto dvojčinné měniče s transformátory se používají v případě požadavku vyšších výstupních výkonů, které jednočinné měniče s transformátory nejsou schopny dosahovat. Nevýhodou jednočinných měničů s transformátory bylo je stejnosměrné sycení mag. jádra, které neumožní využít celou plochu hysterezní smyčky. [4]

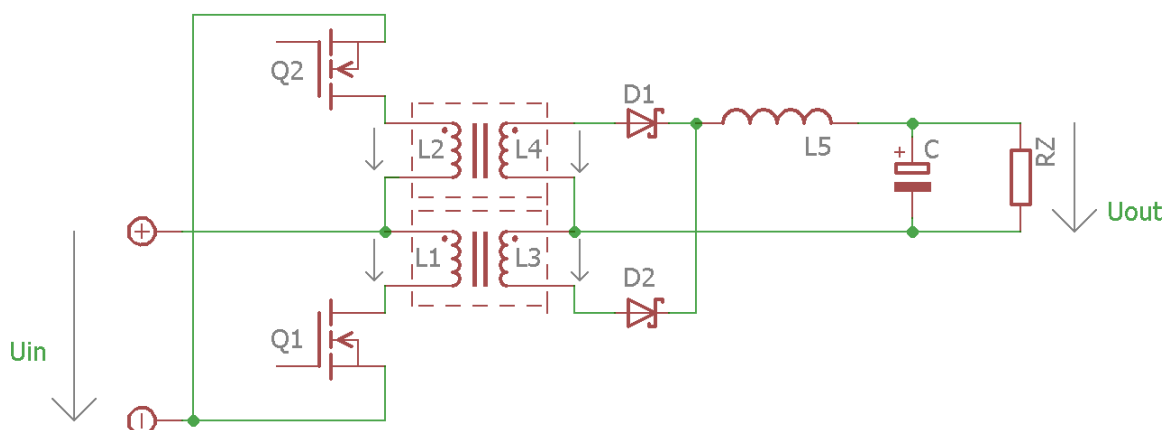
### 2.3.1 Měnič v zapojení push-pull

Zapojení dvojčinného měniče push-pull na obrázku (Obrázek 16) je kombinace dvou zapojení jednočinných měničů, které jsou spojeny jedním mag. obvodem transformátoru  $T_1$ . Tyto dvě zapojení jednočinných měničů fungují protitaktně (v případě, že je tranzistor  $Q_1$  rozepnut, tranzistor  $Q_2$  je sepnut a naopak). Protože vinutí jsou na společném jádře a mají stejnou polaritu a střídavě spínají tranzistory  $Q_1$  a  $Q_2$ , magnetické jádro transformátoru  $T_1$  je střídavě magnetizováno a využívá se tak celé hysterezní smyčky feromag. materiálu. Pro dodání stejného výkonu do zátěže tedy stačí použít poloviční objem jádra transformátoru oproti jádru transformátoru jednočinného zapojení. Měnič pracuje ve dvou fázích.

Během první fáze je tranzistor  $Q_1$  sepnutý a tranzistor  $Q_2$  rozepnutý. Proud teče od kladného pólu vstupního zdroje  $U_{IN}$ , vinutím cívky  $L_1$  transformátoru  $T_1$  a sepnutým tranzistorem  $Q_1$  zpět do vstupního zdroje. Primární cívky vinutí  $L_1$  a  $L_2$  mají stejný počet závitů stejně jako  $L_3$  a  $L_4$ . Tranzistor  $Q_2$  je uzavřen, namáhán závěrným napětím naindukovaným na cívce  $L_2$  a napájecím napětím  $U_{IN}$ . Dioda  $D_2$  je namáhána součtem napětí na sekundárních vinutích  $L_3$  a  $L_4$  a nevede proud. Polarita napětí na cívce  $L_4$  však propustně polarizuje diodu  $D_1$  a proud teče ze sekundárního vinutí cívky  $L_4$  přes tuto diodu  $D_1$ , tlumivku  $L_5$ , kondenzátor  $C$  a zátěž  $R_Z$  a zpět do cívky.

Během druhé fáze spínacího procesu se stav zrcadlově mění. Tranzistor  $Q_2$  je sepnut a tranzistor  $Q_1$  je rozepnut. Proud v této fázi teče od kladného pólu vstupního zdroje  $U_{IN}$  přes primární vinutí  $L_2$ , přes tranzistor  $Q_2$  a zpět do zdroje. Dioda  $D_1$  je namáhána závěrným napětím na vinutích  $L_3$  a  $L_4$ . Dioda  $D_2$  je propustně polarizována, proud teče z vinutí  $L_3$  přes diodu  $D_2$ , tlumivku  $L_5$ , kondenzátor  $C_1$  a zátěž zpět do vinutí  $L_3$ .

Výhodou zapojení je dvojnásobný kmitočet zvlnění na výstupu vzhledem ke spínacímu kmitočtu obvodu. Proto stačí použít ve výstupním LC filtru tlumivku o 4x menší indukčnosti, čímž se sníží počet závitů, zvýší průřez vodiče a dále se sníží ztráty měniče. Tento měnič je používán do výkonu 150 W. [4]



Obrázek 16.: Schéma měniče v zapojení push-pull (tranzistor  $Q_1$  sepnut).

### 2.3.2 Měnič v zapojení polomost

Variant můstkových zapojení je celá řada. Rozlišují se podle uspořádání jednotlivých prvků v mostu. Tzv. polomosty, kde polovinu mostu tvoří dva spínací tranzistory a druhou polovinu tvoří dva kondenzátory, jsou nejčastěji užívané. Toto zapojení na obrázku (Obrázek 17.) je odvozeno z dvojčinného měniče push-pull přidáním tří kondenzátorů.

Každý ze spínacích tranzistorů  $Q_1$  a  $Q_2$  mají své vlastní primární vinutí transformátoru  $T_1$  a v diagonále mostu je pak bipolární elektrolytický kondenzátor s velkou kapacitou. Část impulzního proudu, který by musel jinak pokrývat vstupní zdroj  $U_{IN}$  je pokryta pomocí kondenzátorů  $C_1$  a  $C_2$ . Tranzistory jsou buzeny v protifázi se

střídou do 80 %, aby nehrozilo, že budou oba sepnuté, což by způsobilo zkrat vstupního zdroje  $U_{IN}$ .

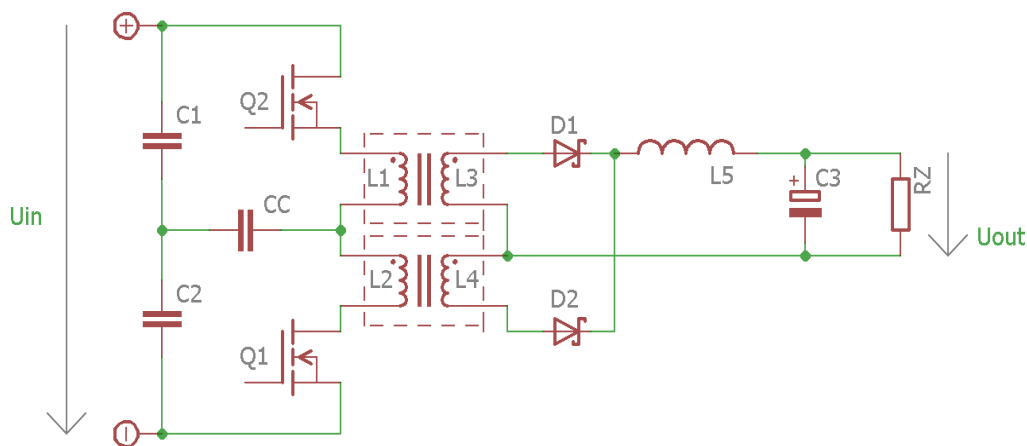
V první fázi je kondenzátor  $C_1$  nabitý, kondenzátor  $C_2$  téměř vybitý a je sepnutý tranzistor  $Q_1$ . Proud protéká od kladné svorky vstupního zdroje  $U_{IN}$  přes sepnutý tranzistor  $Q_1$ , dále přes primární vinutí  $L_1$ , kondenzátor  $C_C$  a kondenzátor  $C_2$  do záporné svorky vstupního zdroje  $U_{IN}$ . Vstupní zdroj  $U_{IN}$  není ideální a napětí tohoto zdroje při dodávání proudu klesá. Nabitý kondenzátor  $C_1$  se vybíjí tak, aby napětí na tomto kondenzátoru klesalo v souladu s poklesem vstupního napájecího napětí  $U_{IN}$ . Tím je zajištěn dostatečně velký proud tranzistorem  $Q_1$  při minimálním poklesu napětí vstupního zdroje  $U_{IN}$ . Kondenzátor  $C_2$  je současně nabíjen, roste na něm napětí a zvyšuje se potenciál spojnice kondenzátorů  $C_1$  a  $C_2$ . Kondenzátor  $C_1$  přenáší náboj do kondenzátoru  $C_2$  a na konci této fáze je kondenzátor  $C_1$  téměř vybitý a kondenzátor  $C_2$  nabitý.

Stejně probíhá fáze při sepnutí tranzistoru  $Q_2$ . Proud protéká z kladné svorky vstupního zdroje  $U_{IN}$  přes kondenzátor  $C_1$ , kondenzátor  $C_C$ , primární vinutí  $L_2$  a sepnutý tranzistor  $Q_2$  zpět do vstupního zdroje  $U_{IN}$ . Kondenzátor  $C_2$  předává svůj náboj kondenzátoru  $C_1$ , na konci fáze je kondenzátor  $C_2$  vybitý a  $C_1$  nabitý, jako tomu bylo na začátku první fáze.

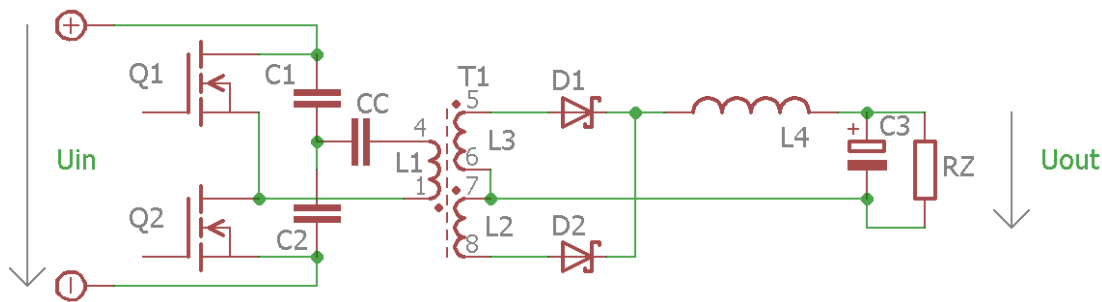
Kondenzátor  $C_C$  nemůže být klasický elektrolytický kondenzátor, protože se na něm vyskytuje napětí obou polarit. Musí mít také poměrně velkou kapacitu.

Při zvýšení odebíraného výstupního výkonu je třeba, aby bylo do transformátoru dodáváno více energie. Toho se dosáhne zvýšením úhlu otevření tranzistorů (kondenzátory  $C_1$  a  $C_2$  se vybíjí déle).

Lze se zbavit dvou primárních vinutí tím, že se použije transformátor s jedním primárním vinutím a toto vinutí se připojí do úhlopříčky mostu s kondenzátorem  $C_C$ , který je v tomto případě pro stejnosměrné oddělení primárního vinutí. Zapojení s jedním vinutím lze vidět na obrázku (Obrázek 18). Fáze spínání probíhají stejně. [4]



Obrázek 17.: Zapojení v polomostu se dvěma primárními vinutími.



Obrázek 18.: Zapojení v polomostu s jedním primárním vinutím.

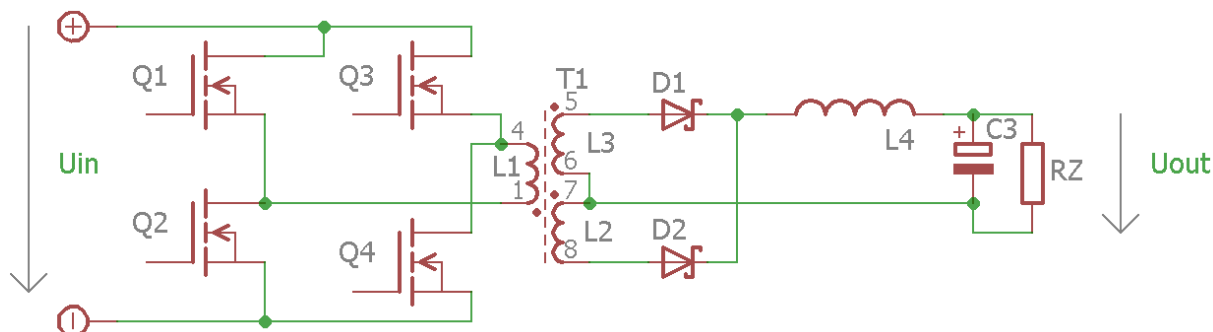
### 2.3.3 Měnič v zapojení plný most

Kondenzátory  $C_1$  a  $C_2$  z předchozího zapojení polomostu jsou nahrazeny tranzistory, čímž vznikne zapojení do mostu plného. V diagonále mezi tranzistory je připojeno primární vinutí cívky  $L_1$  transformátoru  $T_1$ . Zapojení lze vidět na obrázku (Obrázek 19).

Během první fáze jsou tranzistory  $Q_1$  a  $Q_4$  sepnuty a tranzistory  $Q_2$  a  $Q_3$  rozepnuty. Proud tedy v této fázi teče od kladného pólu vstupního zdroje  $U_{IN}$  přes sepnutý tranzistor  $Q_1$ , primární vinutí  $L_1$  transformátoru  $T_1$ , sepnutý tranzistor  $Q_4$  a zpět do vstupního zdroje  $U_{IN}$ .

V druhé fázi jsou tranzistory  $Q_2$  a  $Q_3$  sepnuty a tranzistory  $Q_1$  a  $Q_4$  rozepnuty. Proud v této fázi teče od kladného pólu vstupního zdroje  $U_{IN}$  přes sepnutý tranzistor  $Q_2$ , primární vinutí  $L_1$  transformátoru  $T_1$ , sepnutý tranzistor  $Q_3$  a zpět do vstupního zdroje  $U_{IN}$ .

Protože proud tekoucí ze vstupního zdroje  $U_{IN}$  přes tranzistory, které v sepnutém stavu vykazují nízký odpor přechodu  $R_{DS(on)}$ , je tento měnič schopen dodávat do transformátoru vyšší výkon a tím je transformátor schopen dodat vyšší výkon do zátěže (více než 500 W). Je potřeba však zaručit správné časování spínání jednotlivých dvojic tranzistorů. [4]



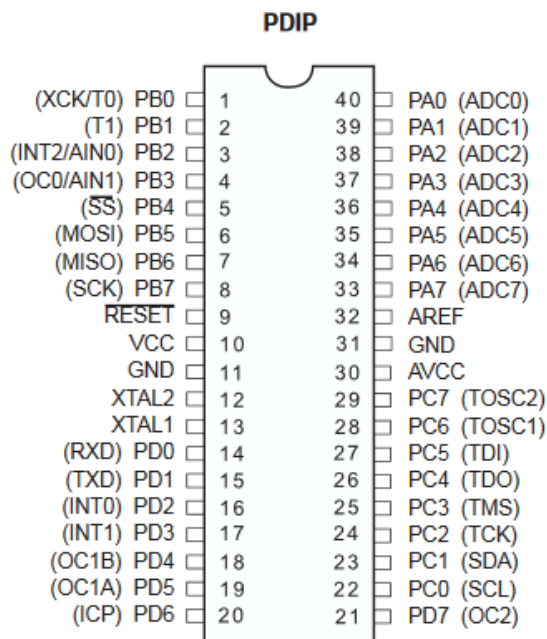
Obrázek 19.: Zapojení měniče s plným mostem.

### 3 MIKROKONTROLÉRY AVR

Vývoj rodiny mikrokontrolérů AVR začal v roce 1996 firmou Atmel. Jsou to 8bitové RISC jednočipové mikrokontroléry založené na upravené Harvardské architektuře. Bývají často používány pro svoji jednoduchost a nízkou cenu pro embedded aplikace. Mezi základní tři typy této rodiny patří tinyAVR (ATtiny série), megaAVR (ATmega série), XMEGA (ATxmega série). Pro svoji jednoduchost a velké množství pomocné literatury byl pro tuto práci zvolen 8bitový mikrokontrolér ATmega16.

#### 3.1 ATmega16

Tento mikrokontrolér firmy ATMEL je 8bitový mikrokontrolér založen na architektuře AVR RISC. Je schopen provést výkonné instrukce v jednohodinovém taktu, čímž dosahuje 1 MIPS na taktu 1 MHz. Pinout mikrokontroléru ATmega16 v pouzdře PDIP lze vidět na obrázku (Obrázek 20). [5]



Obrázek 20.: Pinout mikrokontroléru ATmega16 v pouzdře PDIP.

Základní vlastnosti:

- instrukční soubor o 131 instrukcích
- 32 8bitových registrů
- čtyři 8bitové I/O porty
- interní FLASH paměť o kapacitě 16 kB, kterou lze 1000x přeprogramovat
- RAM paměť o kapacitě 1 kB
- E<sup>2</sup>PROM o kapacitě 512 B, kterou lze 100 000x přeprogramovat
- programování FLASH a E<sup>2</sup>PROM pamětí pomocí SPI nebo JTAG
- dva 8bitové čítače/časovače, jeden 16bitový čítač/časovač
- čtyři PWM kanály
- analogový komparátor a 10bitový AD převodník
- USART, SPI, TWI
- interní RC oscilátor
- napájecí napětí 4,5 až 5,5 V

### 3.1.1 Vstupně-výstupní porty

Mikrokontrolér ATmega16 disponuje čtveřicí 8bitových vstupně-výstupních portů. Tyto porty jsou ovládány třemi registry – DDRX, PORTX, PINX. [5]

- DDRX (data direction register) – nastavením tohoto registru se určuje, zda budou porty sloužit jako vstupní nebo výstupní – např. při DDRB = 0b11110000 budou porty B7-B4 výstupní a porty B3-B0 vstupní
- PORTX – tento registr ovládá logickou úroveň výstupního vývodu. V případě, že je bit definován jako vstupní, tak tento bit určuje, zda je připojen zabudovaný pull-up rezistor
- PINX – tento registr slouží pro čtení z pinu

### 3.1.2 Sériový kanál SPI

Kanál SPI (Seriál peripheral interface) zajišťuje přenos dat mezi mikrokontrolérem a perifériemi, které jsou také vybaveny touto sběrnici. V této práci slouží výhradně k programování mikrokontroléru, tedy k přenosu HEX souboru z počítače do paměti mikrokontroléru. Schopnosti SPI mikrokontroléru Atmega16:

- plný duplex (současné vysílání a přijímání)
- třívodičový synchronní přenos
- lze volit pořadí bitů (MSB až LSB nebo LSB až MSB)

Pro přenos jsou využívány vývody MISO (Master In Slave Out), MOSI (Master Out Slave In) a SCK (Serial clock). SCK je hodinový signal (pro master výstup, pro slave vstup). MOSI je vývod, kterým jsou data z masteru vysouvány ven. Po vysunutí bajtu se generátor clocku, je nastaven bit SPIF v registru SPSR a je generováno přerušení za předpokladu, že je však nastaven bit SPIE a povoleno přerušení. [5]

### 3.1.3 Interní A/D převodník

Mikrokontrolér ATmega16 disponuje interním A/D převodníkem. Je používán pro měření napětí nebo jiných fyzikálních veličin po převodu na napětí bez nutnosti připojení externího A/D převodníku. Tento A/D převodník je 10bitový a pracuje algoritmem postupné aproximace. Je připojen na analogový multiplexer, díky kterému je možno snímat až 10 vstupů. Signál lze sledovat i diferenčně. [5]

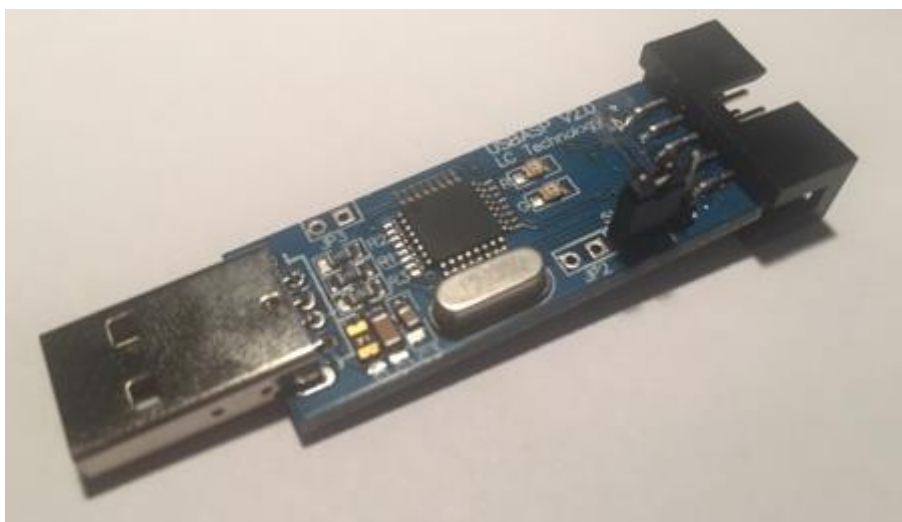
A/D převodník mikrokontroléru ATmega16 vykazuje parametry:

- 10bitové rozlišení
- integrální nelinearita 0,5 LSB
- absolutní chyba  $\pm 2$  LSB
- doba převodu 65 až 260  $\mu$ s
- rychlost převodu až 15 kSPS

## 3.2 Programování mikrokontroléru

Jako vývojové prostředí pro psaní firmwaru bylo vybráno CodeVisionAVR V3.12. Při vytvoření projektu byl nápomocen průvodce vytvořením projektu CodeWizardAVR, pomocí kterého byl nastaven takt 16 MHz, vstupní/výstupní porty, A/D převodník a také alfanumerický LCD displej. Pomocí průvodce lze v případě potřeby také nastavit externí přerušování, UART, nebo časovač.

Po napsání firmwaru v programu CodeVisionAVR je program kompilován a je proveden build. Z textový program s příponou .c se stane soubor s příponou .hex. Ten to soubor je dále pomocí programu eXtreme Burner – AVR v1.4 otevřen a programátorem USBasp (Obrázek 21) V2.0, připojeným přes USB do počítače, nahrán do FLASH paměti řídicího mikrokontroléru ATmega16.



*Obrázek 21.: Programátor USBasp V2.0.*

## 4 NÁVRH ZDROJE

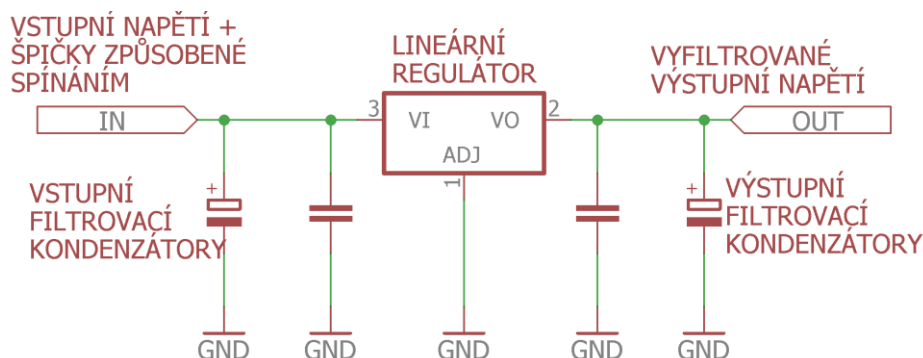
### 4.1 Koncepce zdroje

Při navrhování regulovatelného laboratorního zdroje muselo být ihned na začátku návrhu rozhodnuto, jakou bude tento zdroj mít koncepci. V úvahu přišly dvě varianty – zdroj lineární, který se vyznačuje nízkým výstupním zvlněním, ale také nízkou účinností a velkými nároky na chlazení, nebo zdroj spínaný, který oproti zdrojům lineárním disponuje velmi vysokou účinností, avšak výstupní zvlnění je díky spínáním o vysoké frekvenci nezanedbatelné.

V případě varianty první (lineární zdroj) musí být při maximálním proudu a nízkém napětí na lineárním regulátoru mařena všechna přebytečná energie, která také musí být především ve formě tepla, efektivně odváděna do okolí. Je tedy nutné použití velkého chladiče a většina dostupných lineárních regulátorů nejsou schopny námi požadovaný ztrátový výkon v podobě tepla dlouhodobě pojmout.

Spínanému regulátoru naopak nedělá problém ztrátový výkon, protože je tento výkon díky samotné topologii spínání o dost nižší a čip i při vyšších proudech a nízkých výstupních napětích nemá s chlazením problém. Stačí tedy chladič menší. Jeho výstupní napětí však bez dodatečné filtrace obsahuje pilovité zvlnění odvíjející se od spínací frekvence.

Podle zadání bakalářské práce, kde jsou kladeny požadavky na účinnost zdroje a výstupní zvlnění je užito obou typů regulátorů pro tzv. hybridní topologii nebo také topologii spínané předregulace, kde převážná část rozdílu napětí mezi požadovaným výstupním napětím a vstupním napětím je snížena právě spínaným předregulátorem s vysokou účinností. Výstupní napětí tohoto předregulátoru je však díky vysoké spínací frekvenci nezanedbatelně zvlněno a je potřeba ho vyhladit a již zmiňovaným lineárním regulátorem snížit na minimum. Tato topologie využívá kladné vlastnosti obou typů regulátorů a potlačuje jejich vlastnosti záporné. Na obrázku (Obrázek 22) lze vidět průběh filtrace.

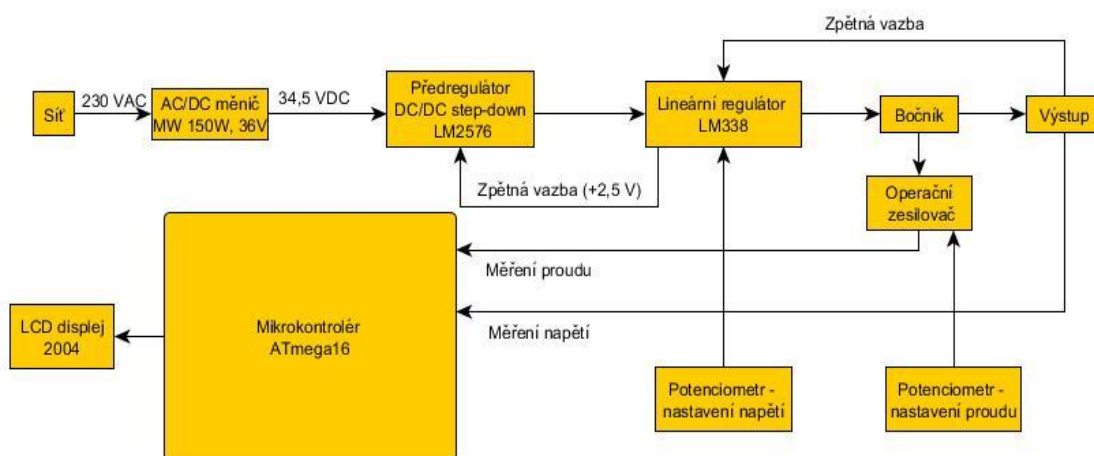


Obrázek 22.: Filtrace výstupního napětí předregulátoru.



## 4.2 Blokové schéma zdroje

Návrh zapojení laboratorního zdroje 30 V / 3 A lze vidět na obrázku (Obrázek 23). Zdroj se skládá z několika bloků. Vstupní síťové napětí je přivedeno na hlavní vypínač a poté do AC/DC měniče Mean-Well, kde na výstupu měniče je nastavené napětí 34,5 V DC. Spínaný AC/DC měnič Mean-Well LRS-150-36 je volen kvůli nižšímu zvlnění (výrobce udává maximální zvlnění 200 mVp-p) a odpadá tak i těžký a prostorný transformátor společně s kondenzátory, které mají vyšší kapacitou. Dalším blokem je DC/DC step-down měnič LM2576, sloužící jako předregulátor pro lineární regulátor LM338. Z lineárního regulátoru je zavedena zpětná vazba do předregulátoru LM2576, která zajišťuje, že na výstupu LM2576 je o 2,5 V vyšší napětí než požadované výstupní napětí na výstupních svorkách zdroje. Zvlnění výstupního napětí spínaného měniče je poté lineárním regulátorem sníženo na minimum. Protože na tomto regulátoru LM338 je nízký a konstantní úbytek napětí, snižují se nároky na jeho chlazení. Z výstupu je zavedena napěťová zpětná vazba do lineárního regulátoru.

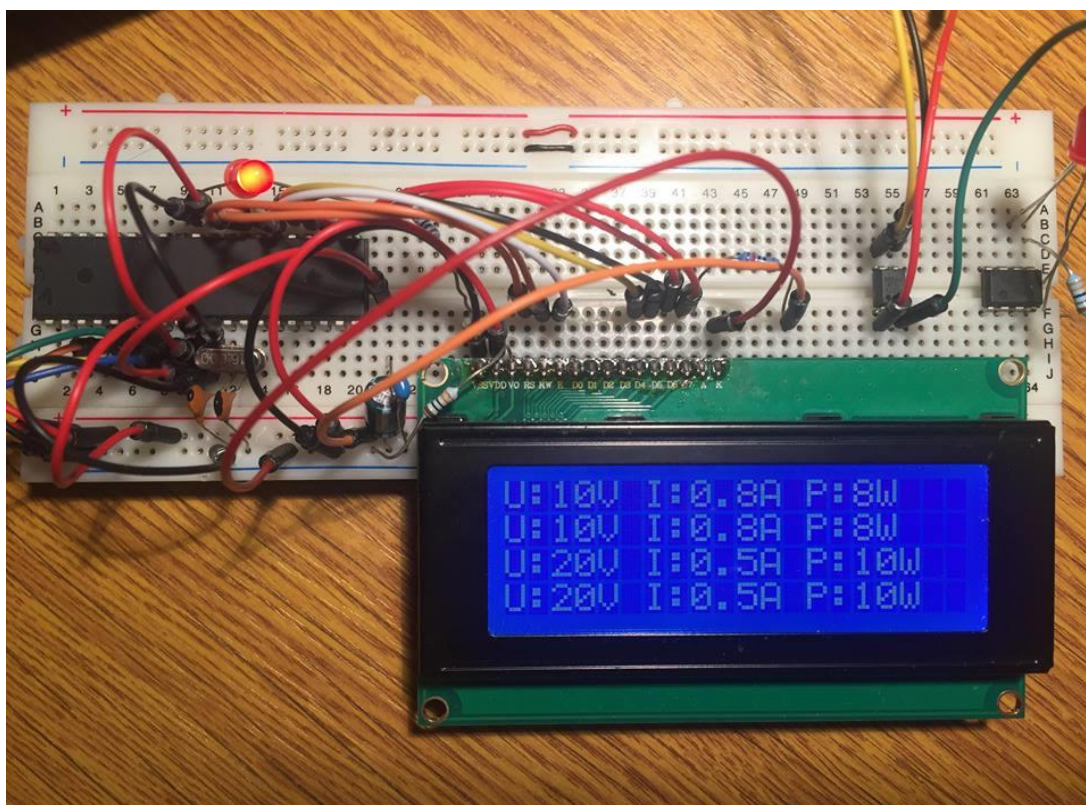


Obrázek 23.: Návrh zapojení laboratorního zdroje.

Výstupní svorkové napětí je přivedeno na vstupní pin interního A/D převodník mikrokontroléru ATmega16. Výstupní proud je snímán v podobě úbytku napětí na bočníku, převeden pomocí interního A/D převodníku na digitální hodnotu a v mikrokontroléru přepočítáván z napětí na proud pomocí známé hodnoty odporu bočníku. Naměřené hodnoty jsou poté zobrazovány na LCD displeji.

Potenciometry na panelu zdroje, slouží k nastavování výstupního napětí a k omezení výstupního proudu.

K zobrazování výstupního napětí, proudu slouží LCD displej. Jak je možno vidět na obrázku (Obrázek 24), jedná se o čtyřřádkový displej, který je schopen zobrazovat 20 znaků na řádek.



*Obrázek 24.: Testování čtyřřádkového displeje*

### 4.3 Vstupní AC/DC měnič Mean-Well LRS 150-36

Prvním blokem je vstupní AC/DC měnič Mean-Well LRS 150-36. Pomocí toho měniče je ze síťového napětí 230 VAC získáno 34,5 V DC až s 89% účinností. Vstupní střídavé napětí 230 VAC o frekvenci 50 Hz je usměrněno a vyfiltrováno. Z tohoto stejnosměrného a vyfiltrovaného napětí je dále pomocí spínacího tranzistoru uděláno střídavé napětí o proměnlivé frekvenci oscilátoru od 50 kHz do 200 kHz. Toto napětí je poté transformátorem sníženo na napětí kolem 40 V, opět usměrněno a vyfiltrováno. Na výstupu je pak měřeno napětí a v případě, že aktuální výstupní napětí není rovno požadovanému, přes zesilovač odchylky a zpětnou vazbu je měněna frekvence oscilátoru, který budí spínací tranzistor.

Díky spínanému vstupnímu zdroji odpadá z konstrukce zdroje těžký a prostorný transformátor, který sám o sobě je nákladnější než celý AC/DC měnič. Odpadají také filtrační kondenzátory o velké kapacitě. Tento zdroj lze vidět na obrázku (Obrázek 25).

#### Parametry:

Výkon: 154,8 W

Vnější rozměry: 159 x 97 x 30 mm

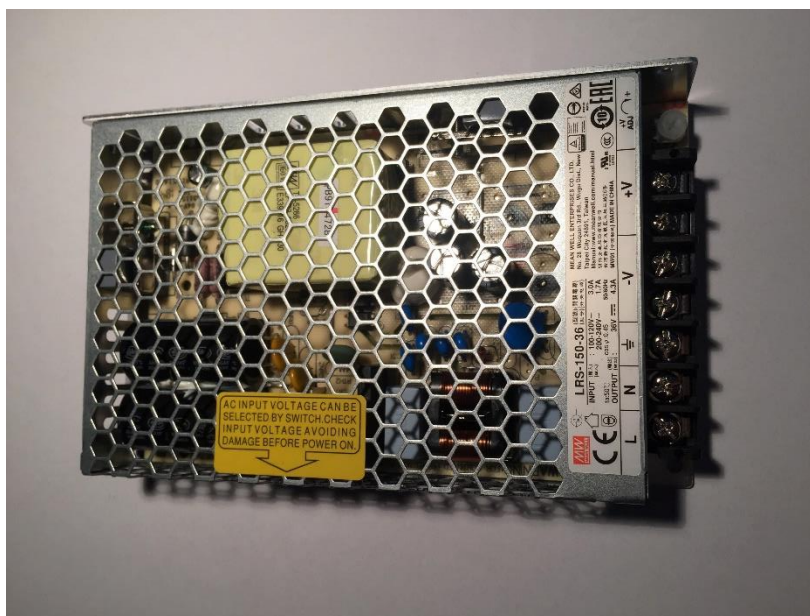
Výstupní proud: 4,3 A

Hmotnost: 480 g

Účinnost: 89 %

Výstupní napětí: 32,4 V až 39,6 V DC

Maximální výstupní zvlnění: 200 mV<sub>p-p</sub>



Obrázek 25.: Vstupní AC/DC měnič Mean-Well LRS 150-36.

## 4.4 Regulovatelný zdroj 30 V/ 3 A

Dalším blokem celku je samotný regulovatelný zdroj s výstupním napětím 30 V a výstupním proudem až 3 A. Regulovatelný zdroj v základu pracuje v režimu konstantního napětí. Může ale pracovat i v režimu konstantního proudu. Schéma zapojení regulovatelného zdroje lze vidět na obrázku (Obrázek 43).

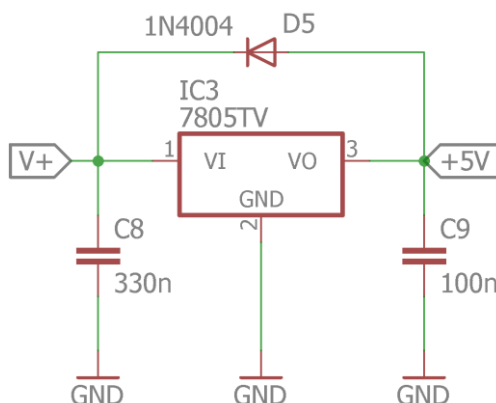
Základem regulovatelného zdroje je předregulátor LM2576HV-ADJ - *IC1*. Na vstup *I-VIN* je přivedeno napětí 34,5 VDC. Vstupní kondenzátory *C*<sub>1</sub>, *C*<sub>2</sub> a *C*<sub>5</sub> jsou tzv. bypass kapacity a slouží jako zásobárna energie. Paralelním připojením keramického kondenzátoru *C*<sub>5</sub> se zvyšuje stabilita regulátoru při nižších teplotách. Na výstupní pin 2-*OUT* je připojena tlumivka *L*<sub>1</sub> o hodnotě indukčnosti 150 µH s dimenzováním na proud 5 A. Schottkyho dioda *D*<sub>1</sub> 1N5822 je velmi rychlá dioda, která umožňuje zpětný průchod proudu tlumivkou, když je spínací tranzistor uvnitř čipu rozepnutý. Za tlumivku *L*<sub>1</sub> je připojen elektrolytický bypass kondenzátor *C*<sub>3</sub> a paralelně k němu keramický kondenzátor *C*<sub>4</sub>. Na pin 4-*FB* je zpětnou vazbou pomocí NPN tranzistoru *Q*<sub>1</sub> a poměru rezistorů *R*<sub>2</sub> a *R*<sub>3</sub> přiváděno napětí zhruba o 2,5 V vyšší, než nastavené výstupní napětí. Mezi předregulátorem a regulátorem je tedy konstantní úbytek napětí 2,5 V. Na pin 4-*FB* je také přiveden výstup *IC2B* pro nastavení proudového omezení viz Měření a nastavení proudového omezení. Pin 5-*OFF* je pro režim zapnutí přiveden na zem. Pin 3-*GND* je taktéž připojen na zem.

Na předregulátor navazuje samotný lineární regulátor LM338. Na jeho vstupní pin *I-IN* je přivedeno vyhlazené výstupní napětí předregulátoru. Toto napětí je přenášeno na výstup *OUT* a pomocí interního zesilovače odchylky regulováno na požadovanou hodnotu nastavenou pomocí potenciometru *R*<sub>15</sub>. Diody *D*<sub>2</sub> a *D*<sub>3</sub> jsou klasické křemíkové diody 1N4004 a slouží k ochraně obvodu.

Dále je ve schématu bočník *R*<sub>5</sub> pro měření proudu a výstupní kondenzátory *C*<sub>7</sub> a *C*<sub>6</sub> pro vyhlazení výstupního napětí.

## 4.5 Stabilizátor napětí 5 V

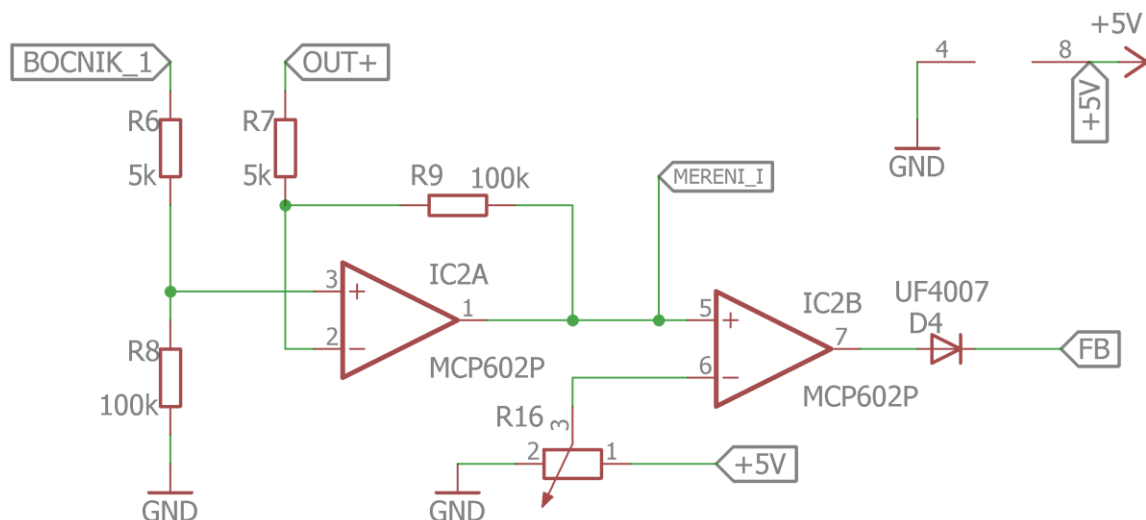
Pro napájení mikrokontroléru, LCD displeje a operačních zesilovačů je použit lineární stabilizátor napětí LM7805, který při vstupním napětí větším než 7 V spolehlivě reguluje výstupní napětí na 5 V. Protože stabilizátor *IC3* poskytuje výstupní proud maximálně 100 mA není potřeba tento stabilizátor chladit. Keramické kondenzátory *C8* a *C9* slouží k vyhlazení napětí a poskytují krátkodobou zásobu energie. Dioda *D5* slouží k ochraně obvodu. Schéma zapojení stabilizátoru LM7805 lze vidět na obrázku (Obrázek 26).



Obrázek 26.: Zapojení stabilizátoru napětí LM7805.

## 4.6 Měření a nastavení proudového omezení

Na bočníku *R5* o hodnotě  $0,07\ \Omega$  je snímán úbytek napětí. Tento napěťový úbytek je pomocí operačního zesilovače *IC2A* zapojeného jako neinvertující zesilovač zhruba 20x zesílen. Výstup zesilovače *IC2A* je přiveden na neinvertující vstup operačního zesilovače *IC2B* zapojeného jako komparátor. Na invertující vstup komparátoru *IC2B* je pomocí víceotáčkového potenciometru přivedeno napětí 0 až 5 V. Komparátor tedy porovnává hodnotu výstupního proudu v podobě napětí s požadovanou hodnotou proudového omezení. V případě, že hodnota výstupního proudu je vyšší než požadovaná, výstup komparátoru *IC2B* je přiveden do 0 V a přes Schottkyho diodu *D4* připojen na pin 4-*FB* předregulátoru LM2576. Uvnitř předregulátoru je zesilovač odchylky připojený na komparátor, kde je poté porovnáván s vnitřní napěťovou referencí 1,23 V. Těchto 0 V na komparátoru způsobí, že spínací tranzistor uvnitř čipu rozepne, výstupní napětí začne klesat až na hodnotu, kdy je výstupní proud roven námi požadovanému a pak opět tranzistor sepne. Takto probíhá regulace výstupního proudu. Schéma zapojení viz Obrázek 27.



Obrázek 27.: Zapojení operačního zesilovače pro proudové omezení.

## 4.7 Mikrokontrolér a periferie

Na obrázku (Obrázek 44) lze vidět schéma zapojení 8bitového mikrokontroléru ATmega16 společně s jeho periferiemi.

Napájení mikrokontroléru je přivedeno na pin *VCC*, který je propojen s pinem *AVCC*. Tento pin slouží jako napěťová reference pro interní A/D převodník pro měření výstupního svorkového napětí a výstupního proudu. Kondenzátory  $C_{10}$ ,  $C_{11}$ ,  $C_{12}$ ,  $C_{13}$  zajišťují stabilitu napájení. K mikrokontroléru je připojen externí 16MHz krystal  $Q_3$ , který určuje takt mikrokontroléru. K němu jsou připojeny 2 kondenzátory 22pF proti zemi.

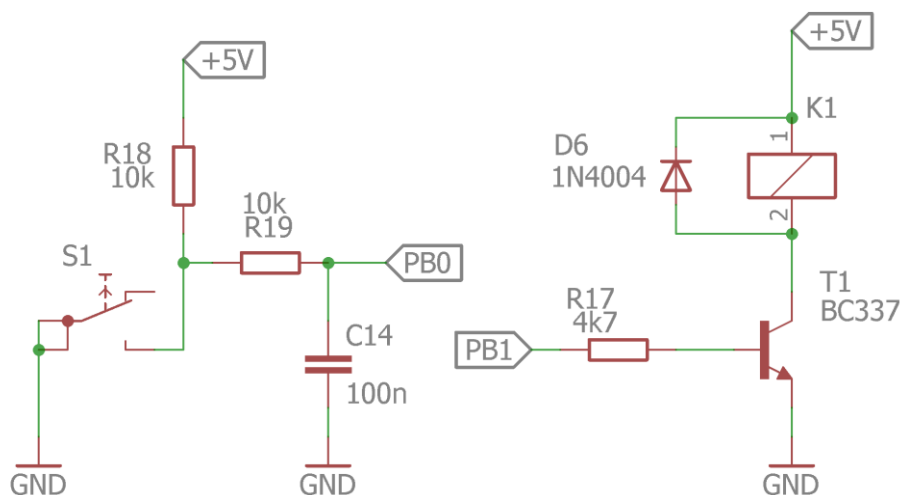
Pro programování mikrokontroléru je na DPS konektor *SVI*. Na něho jsou připojeny piny *RST*, *SCK*, *MISO*, *MOSI*, napájení +5 V a zem. Pomocí těchto pinů je přes programátor USBASP nahráván firmware do mikrokontroléru.

V neposlední řadě je k mikrokontroléru připojen čtyřřádkový LCD displej 2004. Mikrokontrolér s displejem komunikuje pomocí sedmi pinů (*DB7*, *DB6*, *DB5*, *DB4*, *EN*, *RD*, *RS*). Další dva (anoda a katoda) slouží k podsvícení displeje. Piny *VDD* a *VSS (GND)* slouží k napájení displeje. Podle napětí na pinu  $V_0$  je pak nastaven jas textu na displeji. Displej je napájen z 5V stabilizátoru. Pomocí rezistoru  $R_{12}$  je nastavena intenzita podsvícení displeje a rezistorem  $R_{11}$  je nastaven jas textu.



## 4.8 Obvod zapínací výstup

V případě sepnutí spínače  $S_1$  se přes RC filtr typu dolní propust ( $R_{19}$ ,  $C_{14}$ ) na pinu  $PB0$  mikrokontroléru objeví 0 V. Když pin  $PB1$  je nastaven, přes bázevý odpor  $R_{17}$  je sepnut NPN tranzistor  $T_1$ . Tímto tranzistorem začne vést proud a kontakty relé  $K_1$  jsou sepnuty, čímž se na výstupních svorkách objeví výstupní napětí regulovatelného zdroje. Dioda  $D_6$  slouží jako ochrana při rozepínání kontaktů relé a demagnetizaci. Schéma je znázorněno na obrázku (Obrázek 28).



Obrázek 28.: Schéma zapojení obvodu zapínací výstup.

## 5 FIRMWARE MIKROKONTROLÉRU

### 5.1 Základní popis programu mikrokontroléru

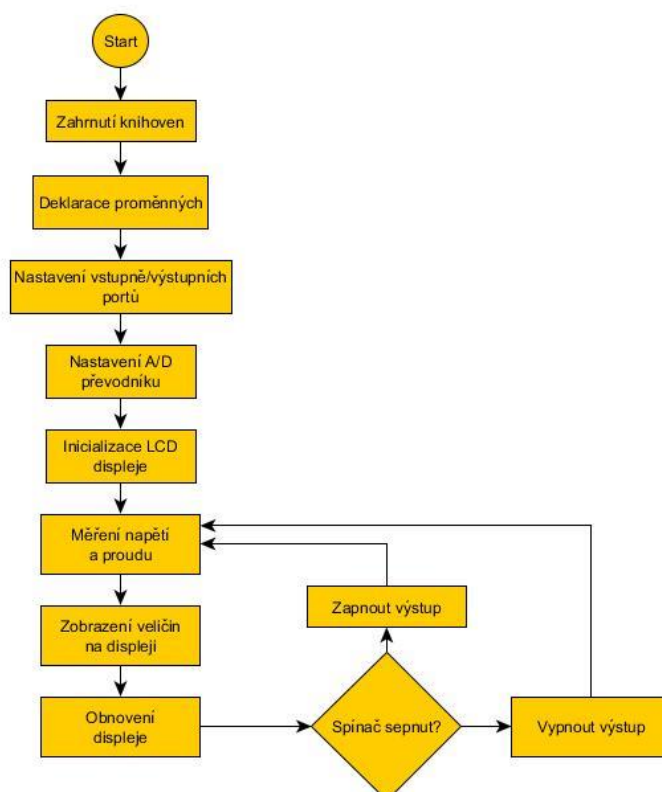
V hlavičce programu jsou zahrnuty knihovny, s kterými bude kompilér pracovat. Dále jsou deklarovány proměnné, proběhne definice vstupně/výstupních portů, nastaví se A/D převodník a inicializuje displej.

Přítomnost výstupního napětí na svorkách je řízena mikrokontrolérem. Na pin PB0 je přes spínač na předním panelu zdroje přiváděno napětí 0 nebo 5 V. V případě, že spínač na předním panelu je sepnut, na výstupu *PB1* se objeví 5 V, přes bazový rezistor je sepnut tranzistor, na kontakty relé je tím přivedeno 5 V a pomocí relé je sepnut výstup.

Měření veličin probíhá pomocí interního 10bitového A/D převodníku. Měření napětí probíhá tak, že na kanál A/D převodníku je přes dělič přivedeno výstupní napětí v rozsahu 0 až 5 V a poté proběhne konverze na digitální hodnotu. Digitální hodnota 1024 po přepočtu odpovídá výstupnímu napětí 30 V. Měření proudu pak probíhá podobným způsobem s tím rozdílem, že na první kanál A/D převodníku je přiveden úbytek napětí na bočniku a zesílen pomocí diferenčního zesilovače.

Měřené veličiny jsou dále zobrazovány na displeji. Pomocí příkazu je vybrán řádek a dalším příkazem je hodnota zapsána na displej. Displej je každých 400 ms obnovován.

Vývojový diagram firmwaru mikrokontroléru je znázorněn na obrázku (Obrázek 29).



Obrázek 29.: Vývojový diagram firmwaru mikrokontroléru.



## 6 KONSTRUKCE ZDROJE

Bloky, ze kterých se zdroj skládá jsou vloženy do černé plastové krabičky KP30 (Z-39) z polystyrénu o rozměrech 295x215x120 mm. Skládá se ze čtyř dílů, dvě čela (záda) a dvě víka s ventilačními otvory. Čelo a záda jsou zasunuty do drážek ve spodním díle, celá krabička je pak uzavřena vložím vrchního víka a zašroubováním čtyř vrutů do drážek přes gumové nožky. [8]

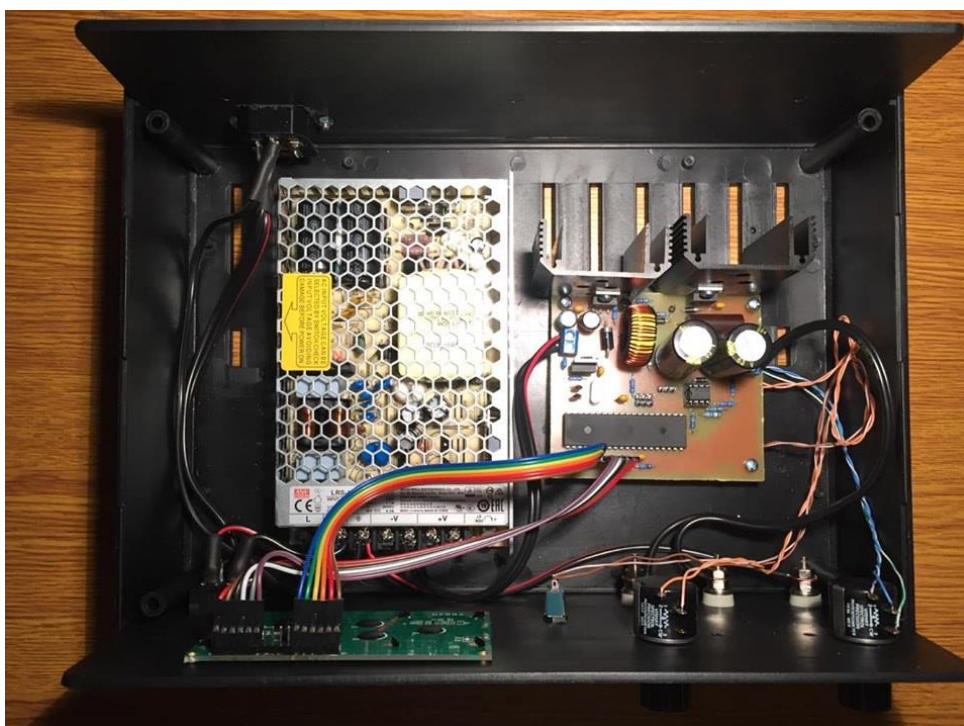
Na zadním panelu se nachází konektor pro napájecí kabel s integrovanou pojistkou.

Na předním panelu se vlevo dole nachází zelený spínač s indikační doutnavkou. Konektory spínače jsou ochráněny smršťovací bužírkou, aby bylo zabráněno dotyku s živými částmi. Vedle spínače se nachází LCD displej, který je pomocí dvou 6vodičových svazků připojen na kolíkovou lištu připojenou k mikrokontroléru. Vpravo nahoře jsou víceotáčkové potenciometry. Levý potenciometr pro nastavení výstupního napětí, pravý potenciometr pro nastavení proudového omezení. Pod ovládacími prvky se nachází šroubovatelné výstupní svorky, do kterých lze zasunout kabel s krokodýlky nebo vodiče zátěže přišroubovat. Na předním panelu je také svorka připojená na ochranný vodič, která může být použita například pro připojení náramku sloužící jako ochrana proti elektrostatickému výboji při pájení polovodičových součástek. Přední panel regulovatelného zdroje se nachází na obrázku (Obrázek 30).



*Obrázek 30.: Přední panel regulovatelného zdroje.*

Pomocí spínače na předním panelu je připojen vstupní AC/DC měnič na síťové napětí – svorky zdroje označené L, N. Na kostru měniče je připojen také ochranný vodič PE. Měniče je pomocí šroubů M3 přichycen k plastové konstrukci, aby bylo zabráněno pohybu v krabici a také kvůli nechtěnému dotyku s živou částí. Z výstupních svorek AC/DC měniče je vyvedeno napětí +34,5 V a 0 V na vstup DPS s regulovatelným zdrojem. Tato DPS je uchycena do krabičky pomocí distančních sloupků. Výkonové prvky - předregulátor a regulátor, jsou šroubkem přichyceny ke chladiči s nanesenou teplovodivou pastou pro lepší přenos tepla. Výstupní napětí je přivedeno na výstupní svorky na předním panelu zdroje. Potenciometry jsou připojeny do DPS pomocí tenkých vodičů. Vnitřní uspořádání regulovatelného zdroje se nachází na obrázku (Obrázek 31).



*Obrázek 31.: Vnitřní uspořádání regulovatelného zdroje*

## 7 MĚŘENÍ CHARAKTERISTIK ZDROJE

### 7.1 Měření charakteristik zdroje

Mezi základní parametry laboratorního zdroje patří účinnost, zvlnění výstupního napětí a vnitřní odpor zdroje. Pro správnost návrhu zapojení a návrhu desky plošných spojů bylo nutno změřit a spočítat základní parametry regulovatelného zdroje. Pro měření byly použity 4 multimetry, digitální osciloskop a dva reostaty jako zátěž. Měřicí přístroje jsou přehledně uvedeny v tabulce (Tabulka 2.)

Tabulka 2.: Seznam přístrojů použitých při měření charakteristik zdroje

Číslo	Název	Přístroj	Značka	Model	Evidenční číslo
1	A1	Stolní multimetr	Keysight	34450A51-B	SAP:001000281837-0000
2	V1	Stolní multimetr	Keysight	34450A51-B	SAP:001000281836-0000
3	A2	Stolní multimetr	Keysight	34450A51-B	SAP:001000281835-0000
4	OSC	Digitální osciloskop	Siglent	SDS1102X+	SDS1XECC2R0310
5	R1	Reostat 30Ω/4,5 A	Metra Blansko	-	2508651
6	R2	Reostat 30Ω/4,5 A	Metra Blansko	-	2508653
7	V2	Multimetr	UNI-T	UT139C	vlastní

### 7.2 Účinnost zdroje

Mezi základní parametry zdroje patří účinnost. Účinnost zdroje obecně je poměr výstupního výkonu ku výkonu vstupnímu neboli poměr příkonu ku výkonu.

$$\eta = \frac{\text{příkon}}{\text{výkon}} \quad (7.1)$$

Nabývá hodnot 0 až 1 a obvykle je udávána v procentech. V tomto případě je účinnost laboratorního zdroje vypočítána podle rovnice (7.2)

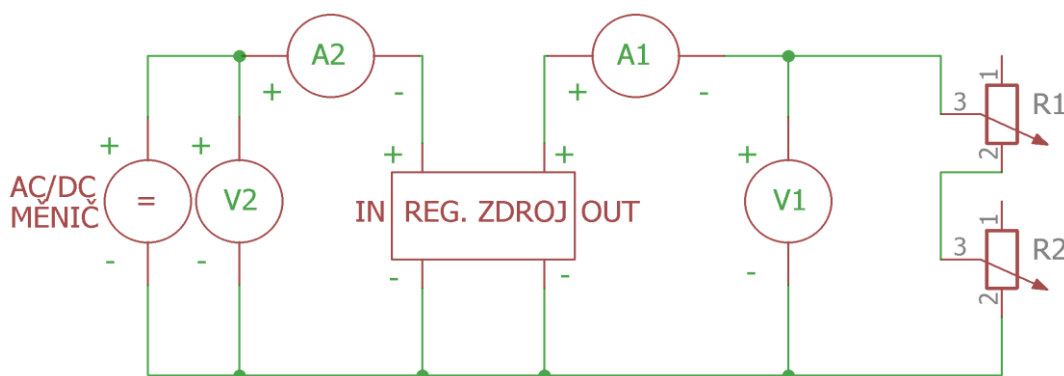
$$\eta = \frac{P_{\text{vstupní}}}{P_{\text{výstupní}}} = \frac{U_{\text{vstupní}} * I_{\text{vstupní}}}{U_{\text{výstupní}} * I_{\text{výstupní}}} \quad (7.2)$$

Ztrátový výkon je rozdíl vstupního výkonu a výstupního výkonu

$$P_{\text{ztrátový}} = P_{\text{vstupní}} - P_{\text{výstupní}} \quad (7.3)$$

Většina energetických ztrát ve zdroji je odvedena ve formě tepla.

Pro měření účinnosti probíhalo podle následujícího postupu. Schéma zapojení lze vidět na obrázku (Obrázek 32). Na zdroji bylo nastaveno výstupní napětí  $U_{\text{výstupní}}$  jednotlivě 10, 20 nebo 30 V. Toto napětí bylo zároveň měřeno a kontrolováno voltmetrem  $V_1$ . Pomocí sériově zapojených reostatů  $R_1$  a  $R_2$  jako zátěž byl nastavován výstupní proud  $I_{\text{výstupní}}$  od 0 do 3 A s krokem 250 mA. Proběhlo 13 měření pro jednu hodnotu výstupního napětí  $U_{\text{výstupní}}$ , celkově tedy 39 měření. Proud  $I_{\text{výstupní}}$  byl měřen pomocí ampérmetru  $A_1$ . Vstupní napětí  $U_{\text{vstupní}}$  bylo měřeno pomocí voltmetru  $V_2$  a vstupní proud  $I_{\text{vstupní}}$  byl měřen ampérmetrem  $A_2$ . Z naměřených hodnot vstupního napětí a vstupního proudu byl poté vypočítán vstupní výkon. Dále byla vypočítána celková účinnost zdroje a ztrátový výkon. Z naměřených a vypočítaných hodnoty byly vytvořeny dva grafy závislosti účinnosti na výstupním proudu.

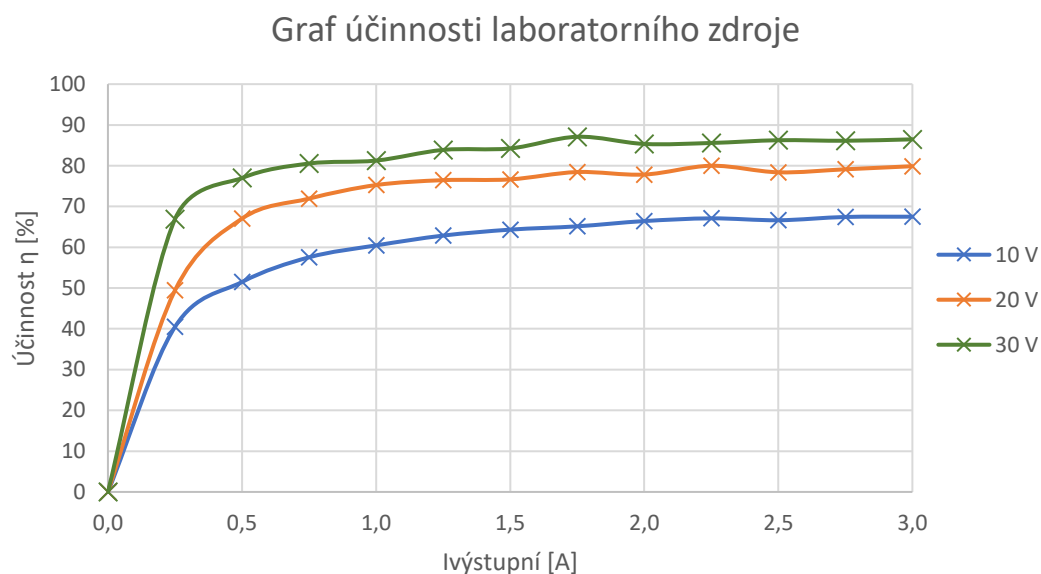


Obrázek 32.: Schéma zapojení pro měření účinnosti laboratorního zdroje.

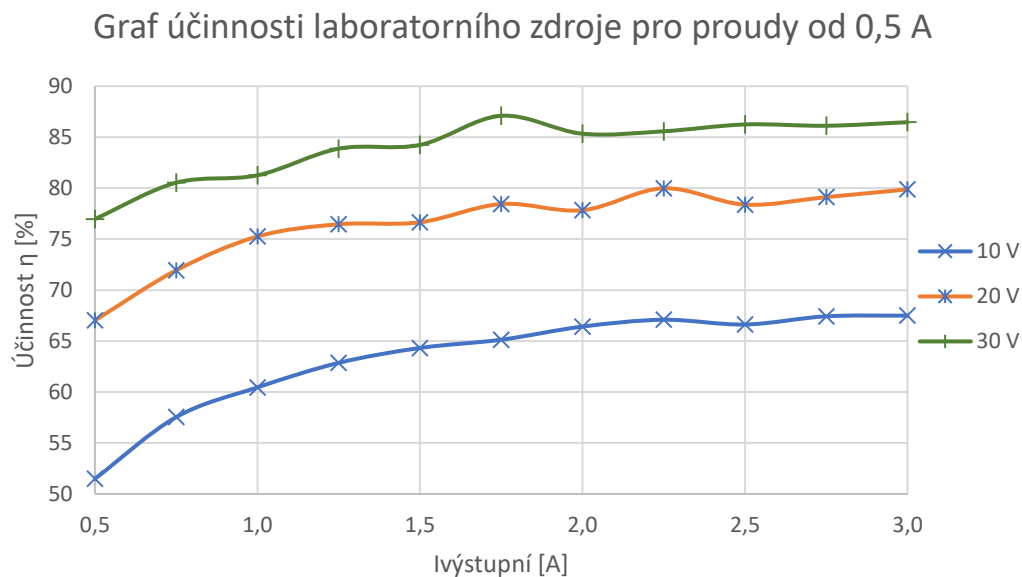
Z grafu účinnosti laboratorního zdroje na obrázku (Obrázek 33) lze vyčíst, že se účinnost pohybuje od 40 do 87 %. Nízká účinnost je typická pro nízké výstupní proudy. Pro proudy 0,5 A a vyšší je účinnost vyšší než 50 % a pro proudy od 1 A je účinnost vyšší než 60 %. Od hodnoty výstupního proudu 1,75 A je účinnost zdroje přibližně konstantní a výrazně se nemění. Pro větší přehlednost byl vytvořen druhý graf s jiným měřítkem, kde na ose Y je vynesena účinnost od 50 do 90 % a na ose X je vynesen proud od 0,5 do 3 A. Tento graf lze vidět na obrázku (Obrázek 34). Tabulky naměřených hodnot jsou uvedeny v příloze bakalářské práce.

Nejnižší účinnosti 40,48 % bylo dosaženo při výstupním napětí 10 V a výstupním proudu 250 mA. Naopak nejvyšší účinnosti 87,10 % bylo podle měření dosaženo při výstupním napětí 30 V a výstupním proudu 1,75 A. Skutečnost, že nejvyšší účinnosti nebylo dosaženo při maximálním proudu, je způsobena nepřesným nastavením nebo odečtem vstupního proudu nebo vstupního napětí. Nejvyšší účinnost je tedy reálně dosaženo při maximálním výstupním výkonu zdroje.

Podle zadání bakalářské práce jsou nároky kladeny právě na účinnost. Maximální účinnost nejpreciznější a také nejdražších laboratorních zdrojů se pohybuje kolem 93 až 95 %. Maximální účinnost navrženého zdroje v této bakalářské práci je kolem 86 %.

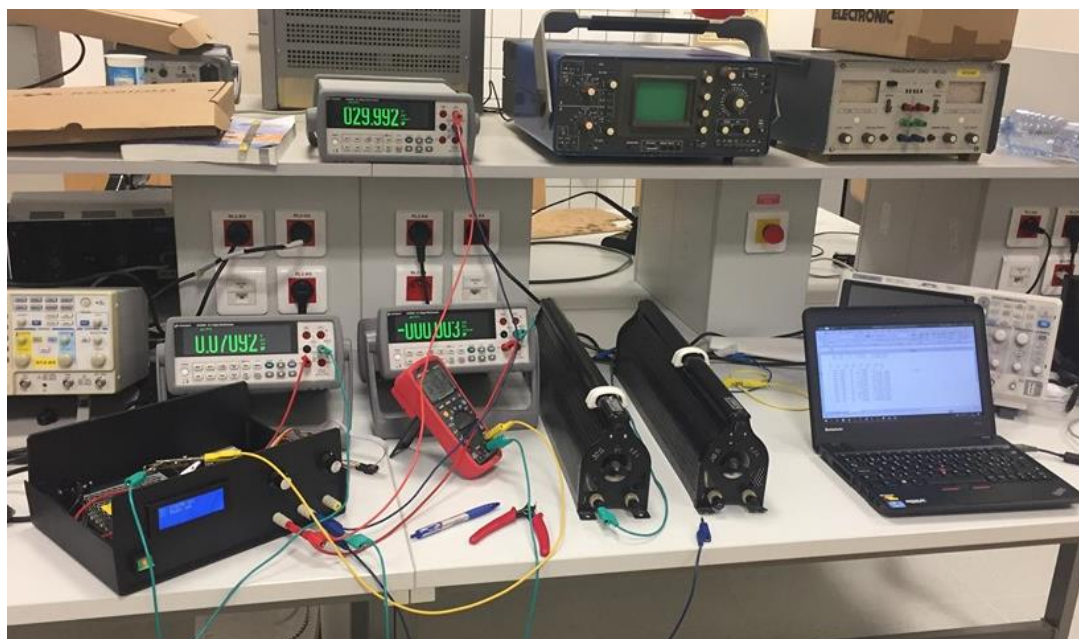


Obrázek 33.: Graf účinnosti laboratorního zdroje.



Obrázek 34.: Graf účinnosti laboratorního zdroje pro proudy od 0,5 A.

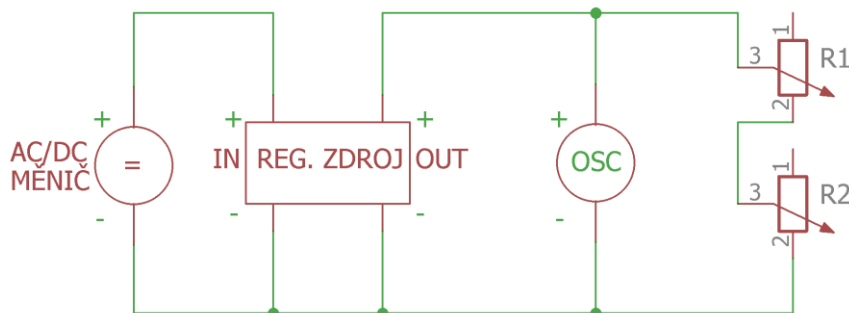
Měření všech charakteristik proběhlo v laboratoři SC 2.83



*Obrázek 35.: Pracoviště pro měření parametrů v laboratoři.*

### 7.3 Zvlnění výstupního svorkového napětí

Dalším důležitým měřeným parametrem je zvlnění výstupního svorkového napětí  $U_{\text{výstupní}}$ . Toto zvlnění je u ideálního stejnosměrného zdroje nulové. U reálných laboratorních zdrojů je však toto zvlnění výstupního napětí nenulové. Požadavek je, aby bylo co nejnižší.



Obrázek 36.: Schéma zapojení pro měření zvlnění výstupního svorkového napětí.

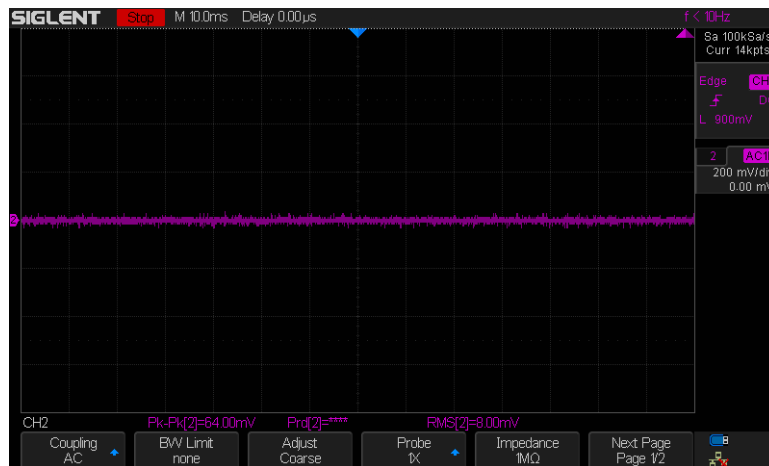
Zvlnění výstupního svorkového napětí zdroje  $U_{\text{zvlnění p-p}}$  bylo měřeno podle schématu zapojení na obrázku (Obrázek 36). Jde o jednoduché měření pomocí osciloskopu *OSC* připojeného na výstupní svorky zdroje. Výstupní napětí je nastaveno na požadovanou hodnot, sériovým zapojením reostatů  $R_1$  a  $R_2$  je nastaven požadovaný proud touto zátěží a na obrazovce osciloskopu je zobrazován průběh výstupního svorkového napětí na kterém je vidno zvlnění. Pro správné zobrazení a podrobné přiblížení je nutno na osciloskopu zvolit AC coupling. V tomto módu osciloskopu filtruje DC offset výstupního svorkového napětí a zobrazuje jen výstupní zvlnění. Zvlnění je měřeno pro výstupní svorkové napětí 10, 20 a 30 V a pro proudy 1, 2 a 3 A. Dále je měřeno zvlnění výstupního napětí při nastaveném proudu zátěží 3 A a následným omezením na 1 a 2 A.

Tabulka 3.: Naměřené hodnoty zvlnění výstupního svorkového napětí.

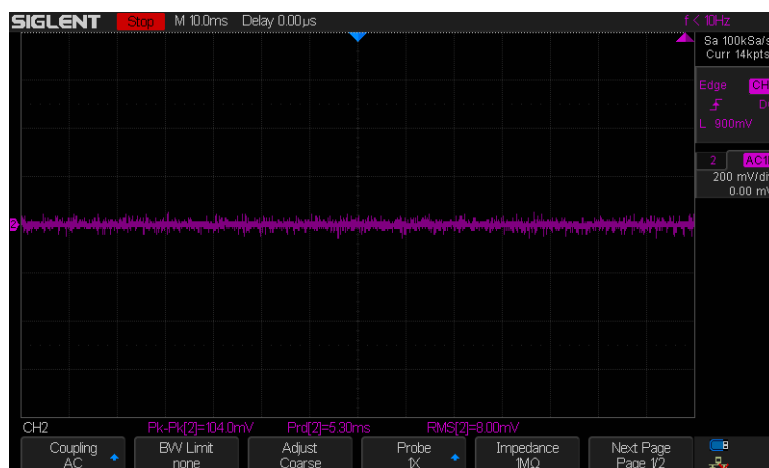
$I_{\text{výstupní}} [\text{A}]$	$U_{\text{výstupní}} = 10 \text{ V}$	$U_{\text{výstupní}} = 20 \text{ V}$	$U_{\text{výstupní}} = 30 \text{ V}$
-	$U_{\text{zvlnění p-p}} [\text{mV}]$		
1	56	64	64
2	56	72	80
3	64	80	104



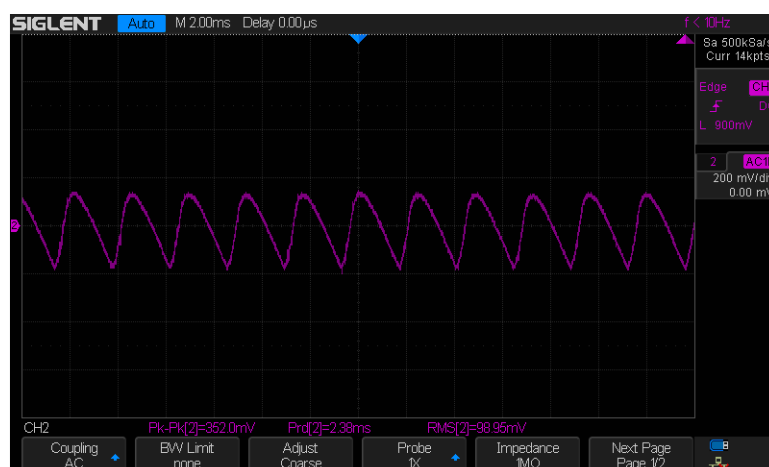
V Tabulka 3 lze vidět naměřené hodnoty zvlnění výstupního svorkového napětí. Nejnižší zvlnění bylo naměřeno při výstupním napětí 10 V a výstupním proudu 1 A a to 56 mV peak-to-peak. Naopak nejvyšší možné zvlnění bylo naměřeno při výstupním napětí 30 V a výstupním proudu 3 A a to 104 mV. Tyto hodnoty zvlnění by ani pro citlivou elektroniku připojenou na výstupních svorkách neměly být kritické.



Obrázek 39.: Zvlnění výstupního napětí při  $U_{\text{výstupní}} = 10 \text{ V}$  a  $I_{\text{výstupní}} = 1 \text{ A}$ .



Obrázek 37.: Zvlnění výstupního napětí při  $U_{\text{výstupní}} = 30 \text{ V}$  a  $I_{\text{výstupní}} = 3 \text{ A}$ .



Obrázek 38.: Zvlnění výstupního napětí při proudovém omezení na  $I_{\text{výstupní}} = 1 \text{ A}$ .



Kritické pro některou citlivější elektroniku by však mohlo být pracovat na napájecím napětí ze zdroje při proudovém omezení. Při omezení proudu zátěží na 1 A bylo naměřeno výstupní zvlnění 352 mV špička-špička. Průběh tohoto zvlnění lze vidět na Obrázek 38. Při nastavení hodnoty na vyšší proud se toto zvlnění snižuje až na hodnoty uvedené v předchozí Tabulka 3.

Regulace omezení výstupního proudu probíhá pomocí zpětné vazby z operačního zesilovače, jak je již popsáno v kapitole Měření a nastavení proudového omezení.

Snížit zvlnění výstupního napětí by se dalo zajistit použitím operačního zesilovače s vyšší rychlostí přeběhu. K dalšímu snížení by došlo při použití LC filtru na výstupu předregulátoru – vstupu lineárního regulátoru.

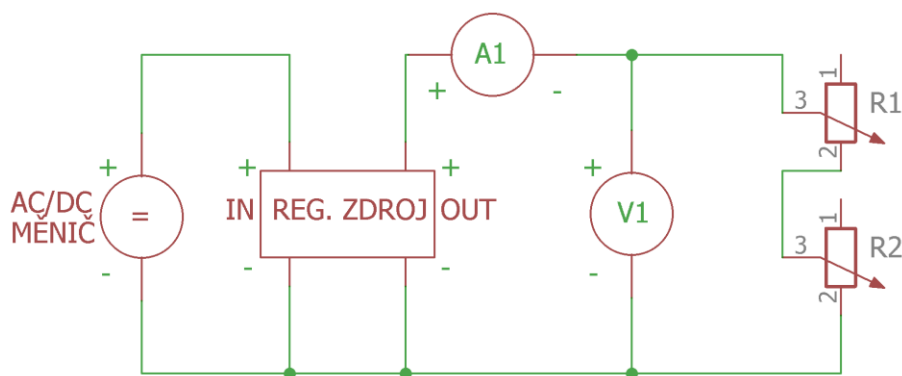
## 7.4 Zatěžovací charakteristika zdroje

Ideální zdroj napětí je schopen udržovat konstantní výstupní svorkové napětí při zvyšování proud zátěží. Toto výstupní napětí je tedy teoreticky konstantní při nekonečně velkém proudu zátěží. Tento ideální napěťový zdroj má tedy vstupní vnitřní odpor  $R_i = 0 \Omega$ .

Reálný napěťový zdroj však vykazuje určitou hodnotu vnitřního odporu  $R_i > 0 \Omega$ . Při zvyšování proudu zátěží tedy díky vnitřnímu odporu zdroje dojde ke snížení výstupního svorkového napětí. Vnitřní odpor reálného zdroje je vypočítán pomocí Ohmova zákona podle následující rovnice.

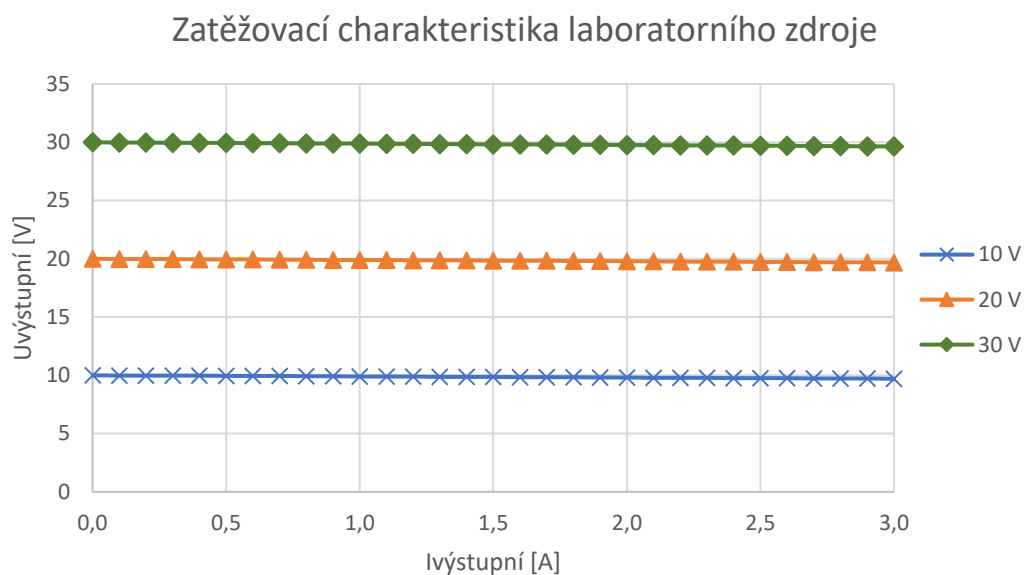
$$R_i = \frac{U_{\text{naprázdno}} - U_{\text{výstupní}}}{I_{\text{výstupní}}} \quad (7.4)$$

Měření zatěžovací charakteristiky (závislosti výstupního napětí  $U_{\text{výstupní}}$  na výstupním odebíraném proudu  $I_{\text{výstupní}}$ ) laboratorního zdroje bylo provedeno podle schématu na Obrázek 40. Při měření je zanedbáván velmi malý úbytek napětí na ampérmetru  $A_1$ , protože jeho odpor je velmi nízký a je také zanedbáván velmi malý proud voltmetrem  $V_1$ , protože jeho vnitřní odpor je velmi vysoký. Měření charakteristiky proběhlo pro hodnoty výstupního napětí naprázdno  $U_{\text{naprázdno}}$  10, 20 a 30 V. Toto napětí bylo měřeno voltmetrem  $V_1$ . Po nastavení požadovaného výstupního napětí naprázdno byla připojena zátěž. Výstupní proud  $I_{\text{výstupní}}$  byl pomocí sériově zapojených reostatů  $R_1$  a  $R_2$  nastavován od 0 do 3 A s krokem 100 mA a měřen ampérmetrem  $A_1$ . Po nastavení požadovaného výstupního proudu bylo z voltmetru  $V_1$  odečteno výstupní napětí  $U_{\text{výstupní}}$ . Pro každou hodnotu výstupního napětí naprázdno bylo měřeno 30 hodnot výstupního napětí. Celkově tedy bylo naměřeno 90 hodnot. Z naměřených hodnot byl vypočítán vnitřní odpor zdroje  $R_i$  a vytvořena zatěžovací charakteristika zdroje. Tato charakteristika je na obrázku (Obrázek 41).



Obrázek 40.: Schéma zapojení pro měření zatěžovací charakteristiky zdroje.

Ze zatěžovací charakteristiky laboratorního zdroje je patrné, že pokles výstupního svorkového napětí  $U_{\text{výstupní}}$  při výstupním proudu  $I_{\text{výstupní}}$  do 2 A je minimální a to maximálně 250 mV. Při dalším zvyšování výstupního proudu však výstupní svorkové napětí klesá a liší se od požadovaného napětí  $U_{\text{naprázdno}}$  až o 353 mV. Vnitřní odpor zdroje  $R_i$  podle výpočtu vychází mezi 90 až 160 m $\Omega$ .



*Obrázek 41.: Zatěžovací charakteristika laboratorního zdroje*

## 8 ZÁVĚR

V této bakalářské práci byla popsána problematika stejnosměrných napěťových zdrojů. Nejprve byly popsány základní části topologie zdroje lineárního a poté zdroje spínaného. Následovalo srovnání těchto zdrojů, jejich hlavních výhody a nevýhod.

Byly popsány funkce základních topologií spínaných zdrojů s cívkou i transformátorem a k popisům byly doplněny schémata těchto zapojení.

Nechybí také popis základních vlastností použitého mikrokontroléru ATmega16, jeho vstupně-výstupních registrů, SPI a interního A/D převodníku.

V předposlední části bylo navrženo základní blokové zapojení laboratorního zdroje 30V / 3A řízeného mikrokontrolérem ATmega16. Na vstupu zdroje je použit spínaný AC/DC měnič 230VAC / 34VDC. Tím není potřeba použít transformátor, odpadají tak i velké vyhlazovací kondenzátory a je sníženo vstupní zvlnění napětí. Zdroj pracuje v hybridní topologii, kdy spínaný zdroj s vysokou účinností zastává funkci předregulátoru. Tím je zachována vysoká účinnost. Jsou tak kladeny nižší nároky na chlazení, a zároveň díky lineárnímu regulátoru je výstupní zvlnění sníženo. Pro ovládání zdroje jsou použity potenciometry na předním panelu zdroje, měřené veličiny napětí a proudu jsou zobrazovány na LCD displeji. Výstup je řízen mikrokontrolérem.

Bylo navrženo schéma a ověřena funkčnost zapojení. Následně byla navržena DPS a poté zdroj realizován. Dále byl napsán firmware pro mikrokontrolér, zdroj byl oživen, odzkoušen a byly změřeny reálné parametry zdroje - účinnost, zatěžovací charakteristika a zvlnění výstupního svorkového napětí.

Zdroj měl být navržen s požadavky na vysokou účinnost a nízké zvlnění výstupního napětí. Podle měření nabývá účinnost hodnot až kolem 87 %. Zvlnění výstupního napětí je v rozsahu od 56 do 104 mV.

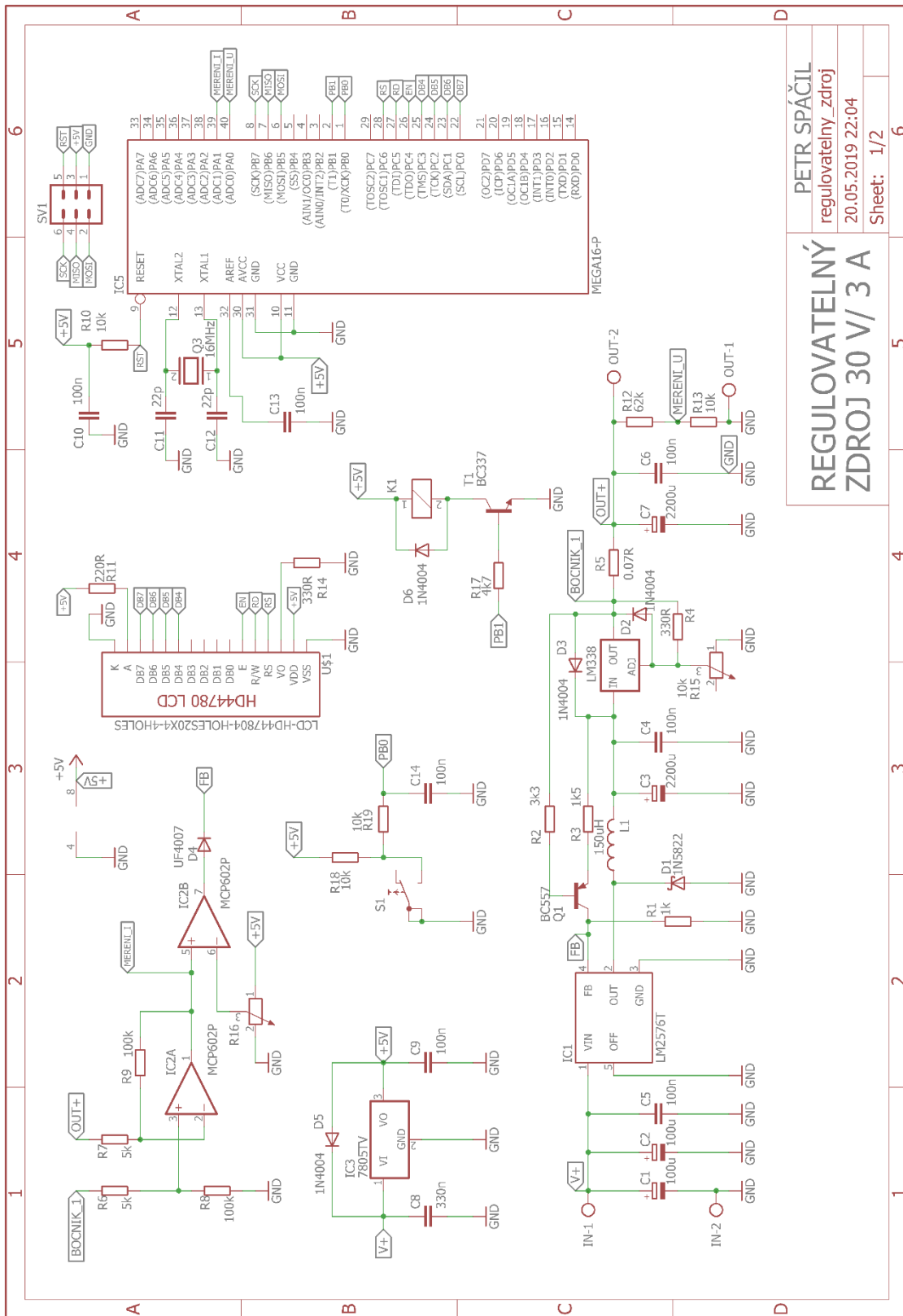
# LITERATURA

- [1] KREJČÍŘÍK, Alexandr. *Napájecí zdroje I*. 2. vydání. Praha: BEN - technická literatura, 1996, 351 s. ISBN 80-86056-02-3.
- [2] KREJČÍŘÍK, Alexandr. *Napájecí zdroje II*. 2. vydání. Praha: BEN - technická literatura, 1996, 351 s. ISBN 80-86056-03-1.
- [3] KREJČÍŘÍK, Alexandr. *Napájecí zdroje III*. Praha: BEN - technická literatura, 1999. ISBN 80-86056-56-2.
- [4] KREJČÍŘÍK, Alexandr. *DC/DC měniče*. Praha: BEN, 2001. ISBN 80-7300-045-8.
- [5] MATOUŠEK, David. *Práce s mikrokontroléry ATMEL AT89C2051: [měření, řízení a regulace pomocí několika jednoduchých přípravků]*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-174-8.
- [6] LM338 datasheet. In: *Texas Instruments* [online]. [cit. 2019-05-29]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symmlink/lm338.pdf>
- [7] LM2576 datasheet. In: *Texas Instruments* [online]. [cit. 2019-05-29]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symmlink/lm2576.pdf>
- [8] Datasheet KP30 (Z-39). In: *GME* [online]. [cit. 2019-05-29]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/krabicka-plastova-kp30-z-39>
- [9] Datasheet ATmega16. In: *GME* [online]. [cit. 2019-05-29]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.958-112.1.pdf>
- [10] Datasheet LM7805. In: *Texas Instruments* [online]. [cit. 2019-05-29]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symmlink/lm340.pdf>
- [11] Datasheet LCD display 2004. In: *Beta Estore* [online]. [cit. 2019-05-29]. Dostupné z: [https://www.beta-estore.com/download/rk/RK-10290\\_410.pdf](https://www.beta-estore.com/download/rk/RK-10290_410.pdf)

# SEZNAM PŘÍLOH

Obrázek 40.: Schéma zapojení laboratorního zdroje .....	53
Obrázek 41.: Schéma zapojení regulovatelného zdroje .....	54
Obrázek 42.: Zapojení mikrokontroléru s periferiemi .....	55
Obrázek 43.: Navržená DPS regulovatelného zdroje .....	56
Obrázek 44.: Předloha DPS pro leptání .....	57
Obrázek 45.: Průběh výstupního zvlnění při $U_{\text{výstupní}} = 10 \text{ V}$ a $I_{\text{výstupní}} = 1 \text{ A}$ .....	58
Obrázek 46.: Průběh výstupního zvlnění při $U_{\text{výstupní}} = 10 \text{ V}$ a $I_{\text{výstupní}} = 2 \text{ A}$ .....	58
Obrázek 47.: Průběh výstupního zvlnění při $U_{\text{výstupní}} = 10 \text{ V}$ a $I_{\text{výstupní}} = 3 \text{ A}$ .....	59
Obrázek 48.: Průběh výstupního zvlnění při $U_{\text{výstupní}} = 20 \text{ V}$ a $I_{\text{výstupní}} = 1 \text{ A}$ .....	59
Obrázek 49.: Průběh výstupního zvlnění při $U_{\text{výstupní}} = 20 \text{ V}$ a $I_{\text{výstupní}} = 2 \text{ A}$ .....	60
Obrázek 50.: Průběh výstupního zvlnění při $U_{\text{výstupní}} = 20 \text{ V}$ a $I_{\text{výstupní}} = 3 \text{ A}$ .....	60
Obrázek 51.: Průběh výstupního zvlnění při $U_{\text{výstupní}} = 30 \text{ V}$ a $I_{\text{výstupní}} = 1 \text{ A}$ .....	61
Obrázek 52.: Průběh výstupního zvlnění při $U_{\text{výstupní}} = 30 \text{ V}$ a $I_{\text{výstupní}} = 2 \text{ A}$ .....	61
Obrázek 53.: Průběh výstupního zvlnění při $U_{\text{výstupní}} = 30 \text{ V}$ a $I_{\text{výstupní}} = 3 \text{ A}$ .....	62
Obrázek 54.: Průběh výstupního zvlnění při proudovém omezení na 1 A. ....	62
Obrázek 55.: Průběh výstupního zvlnění při proudovém omezení na 2 A. ....	63
Tabulka 4.: Tabulka naměřených hodnot při měření zatěžovací charakteristiky .....	64
Tabulka 5.: Tabulka naměřených hodnot účinnosti při výstupním napětí naprázdno 10 V .....	65
Tabulka 6.: Tabulka naměřených hodnot účinnosti při výstupním napětí naprázdno 20 V .....	65
Tabulka 7.: Tabulka naměřených hodnot účinnosti při výstupním napětí naprázdno 20 V .....	66

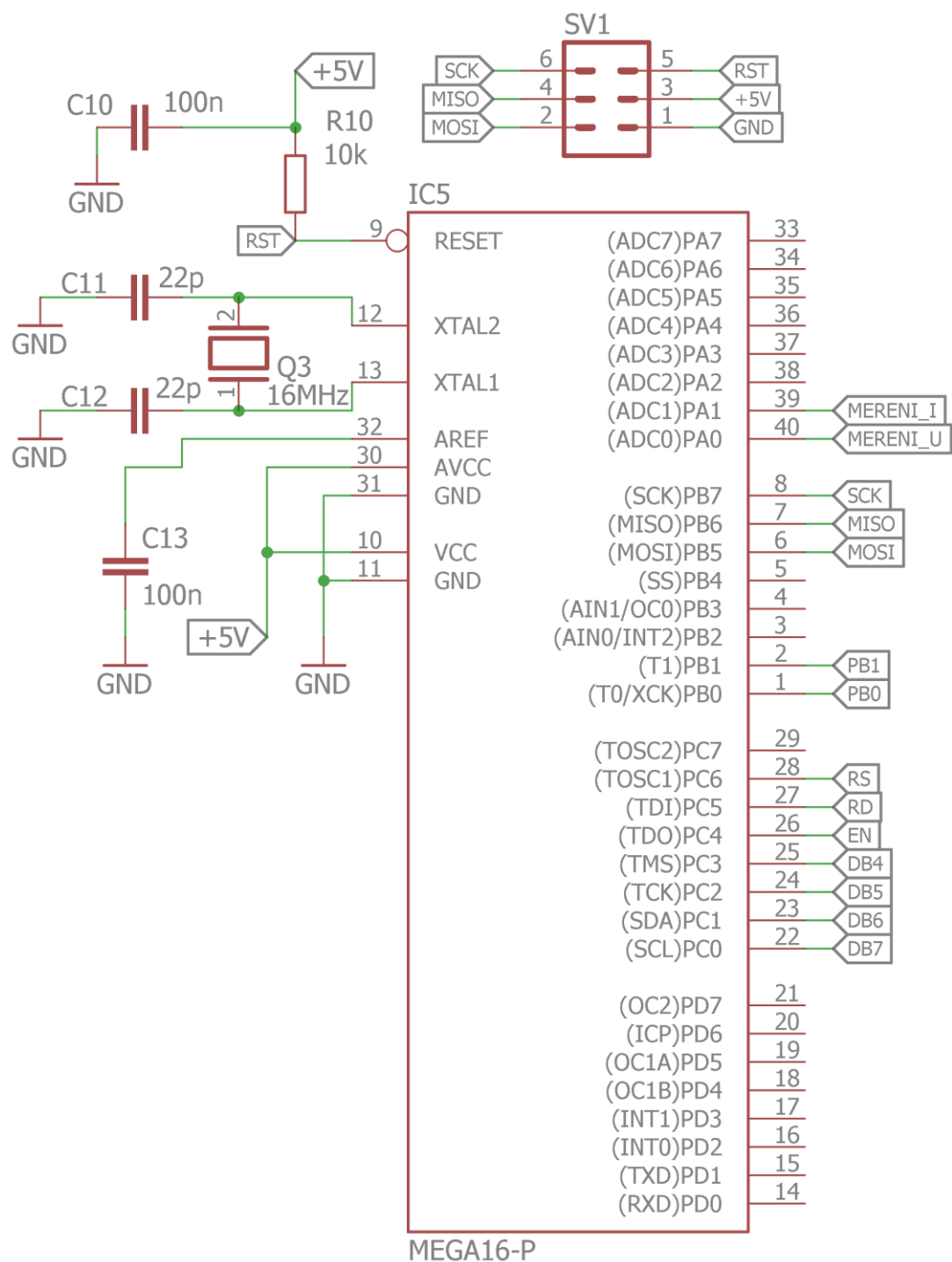
## I. SCHÉMATA ZAPOJENÍ



*Obrázek 42.: Schéma zapojení laboratorního zdroje*

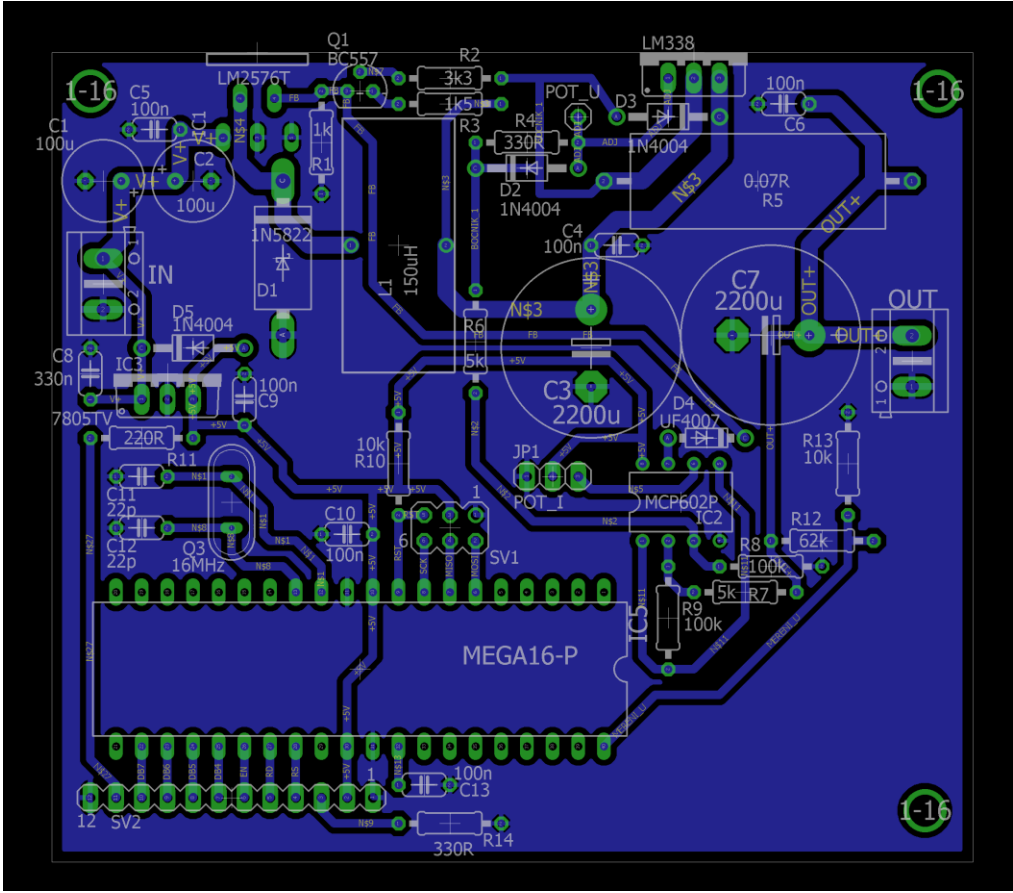




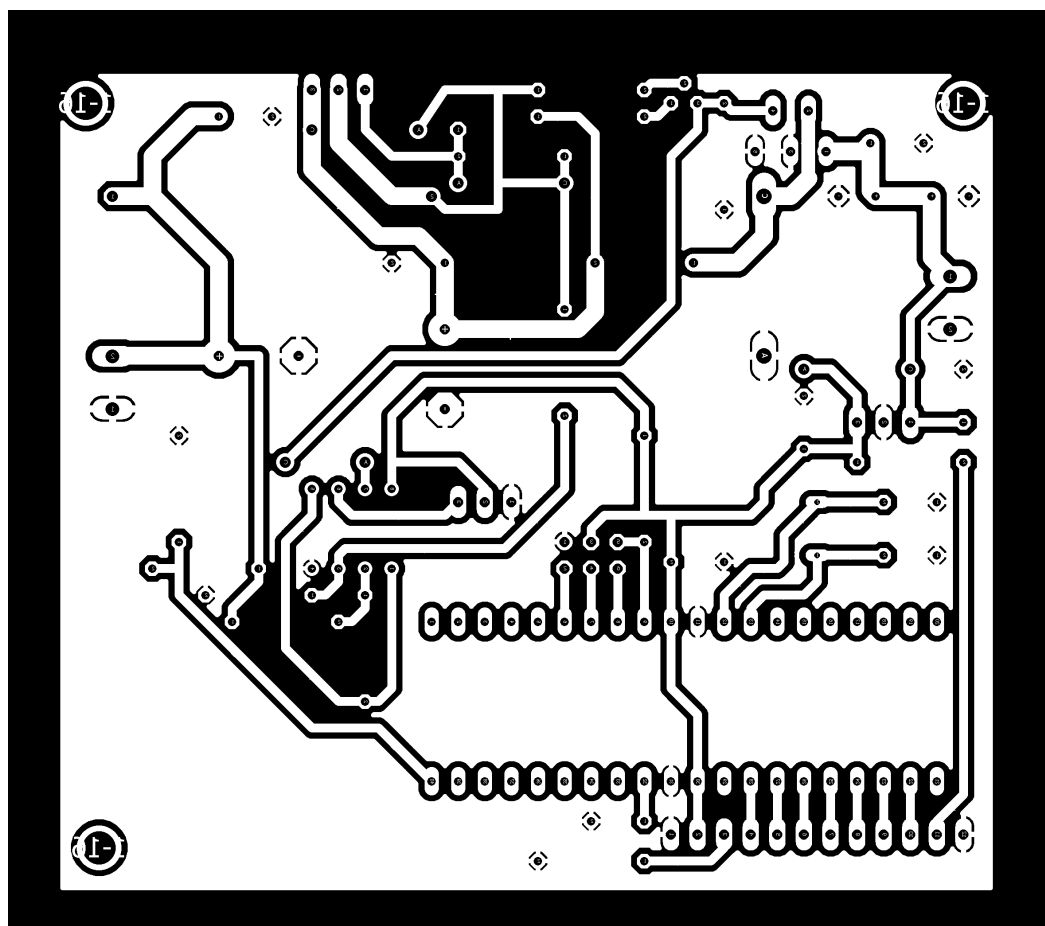


Obrázek 44.: Zapojení mikrokontroléru s periferiemi

## II. NÁVRH DPS

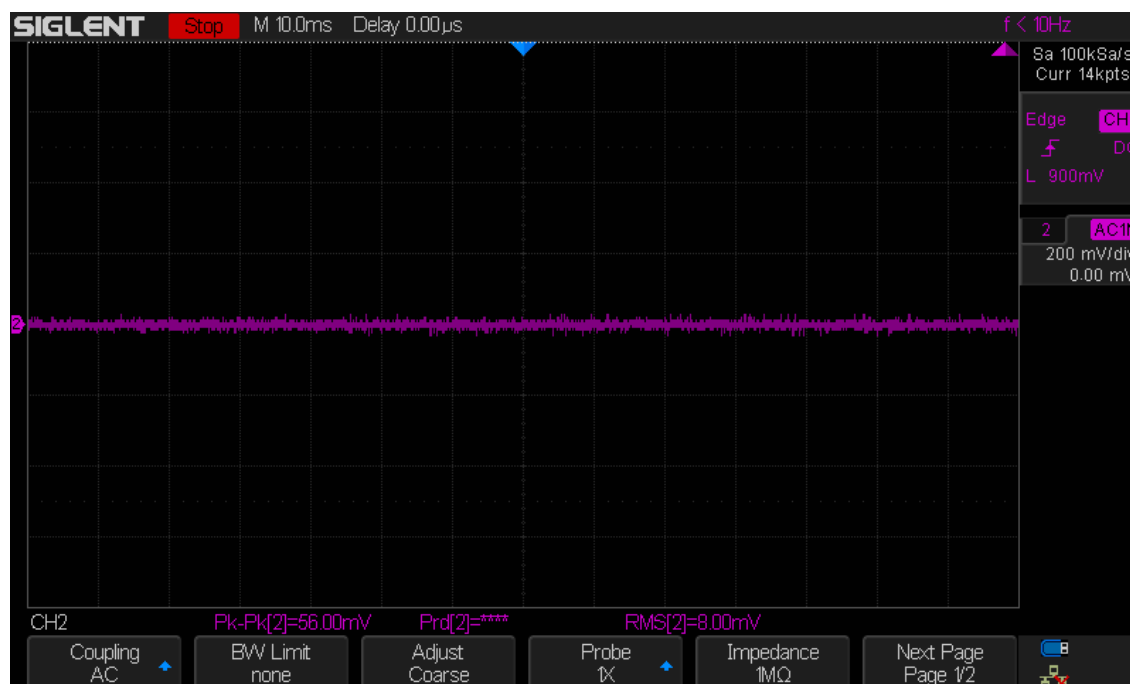


*Obrázek 45.: Navržená DPS regulovatelného zdroje*

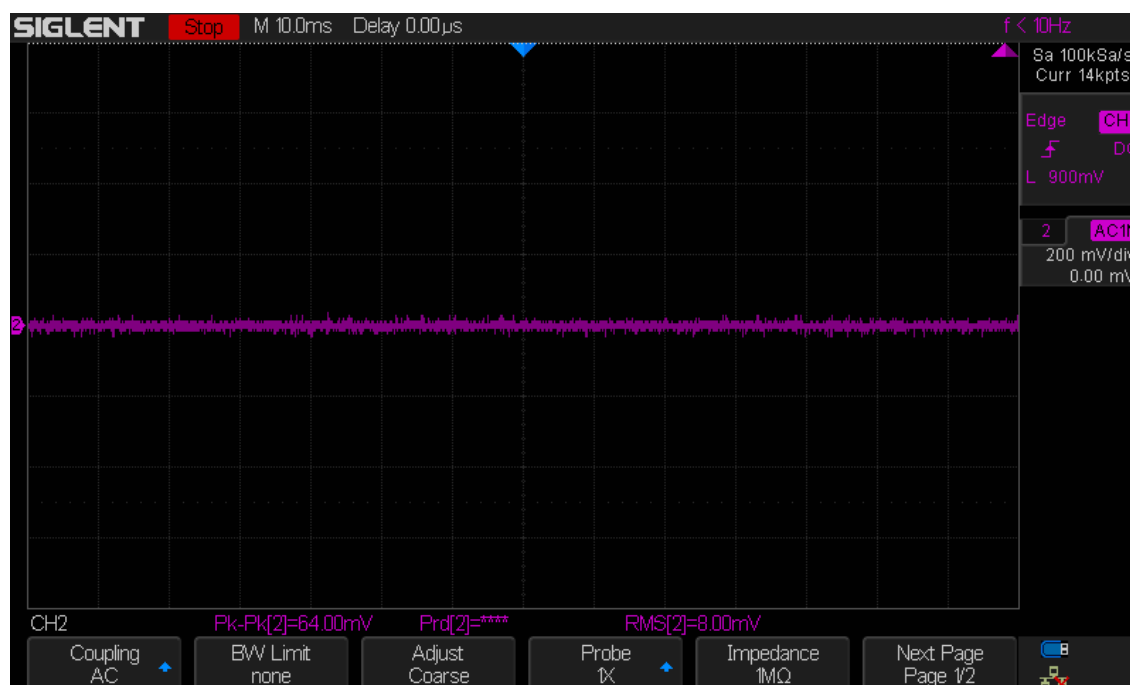


Obrázek 46.: Předloha DPS pro leptání

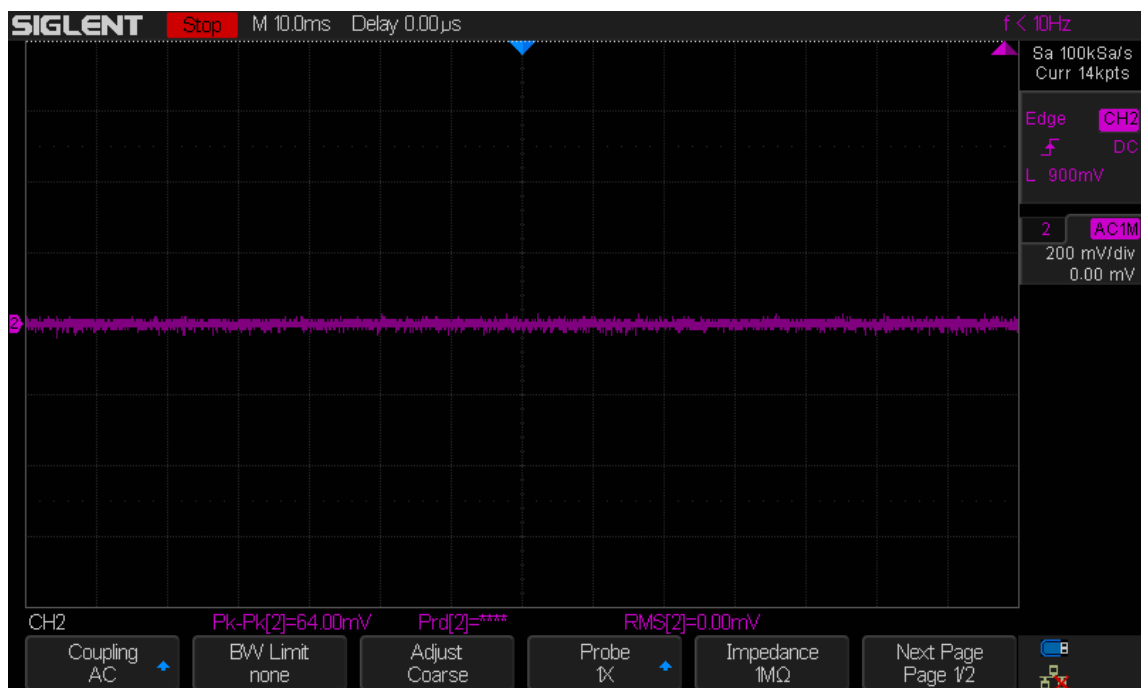
### III. PRŮBĚHY VÝSTUPNÍHO ZVLNĚNÍ



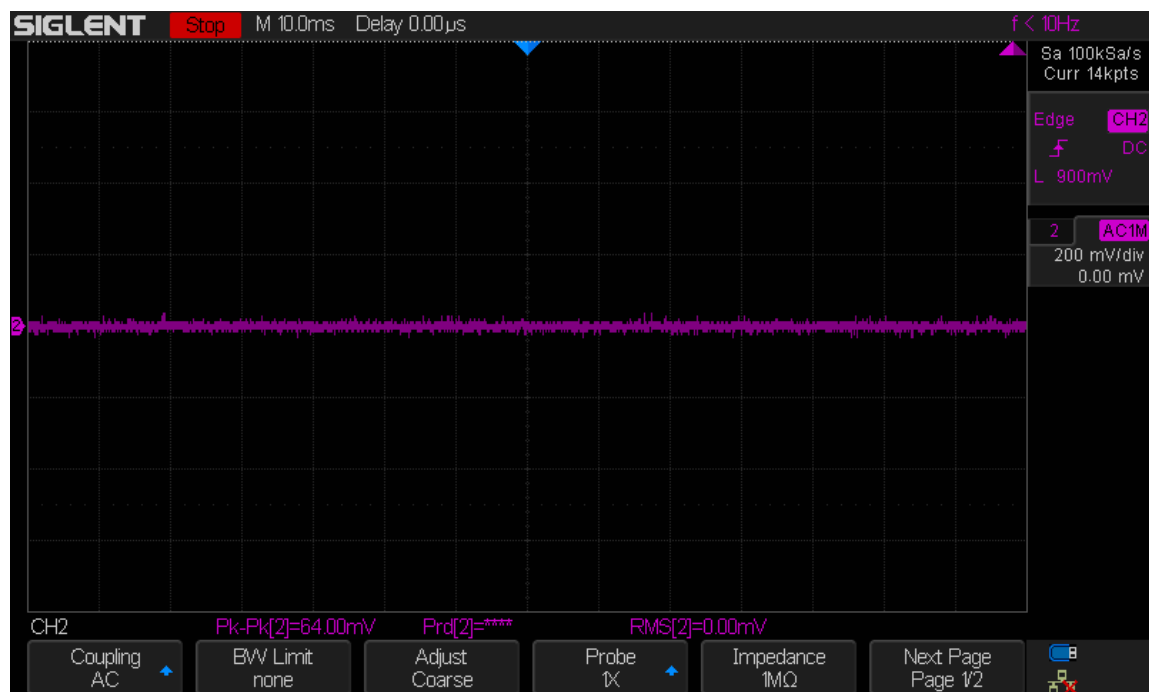
Obrázek 47.: Průběh výstupního zvlnění při  $U_{\text{výstupní}} = 10 \text{ V}$  a  $I_{\text{výstupní}} = 1 \text{ A}$ .



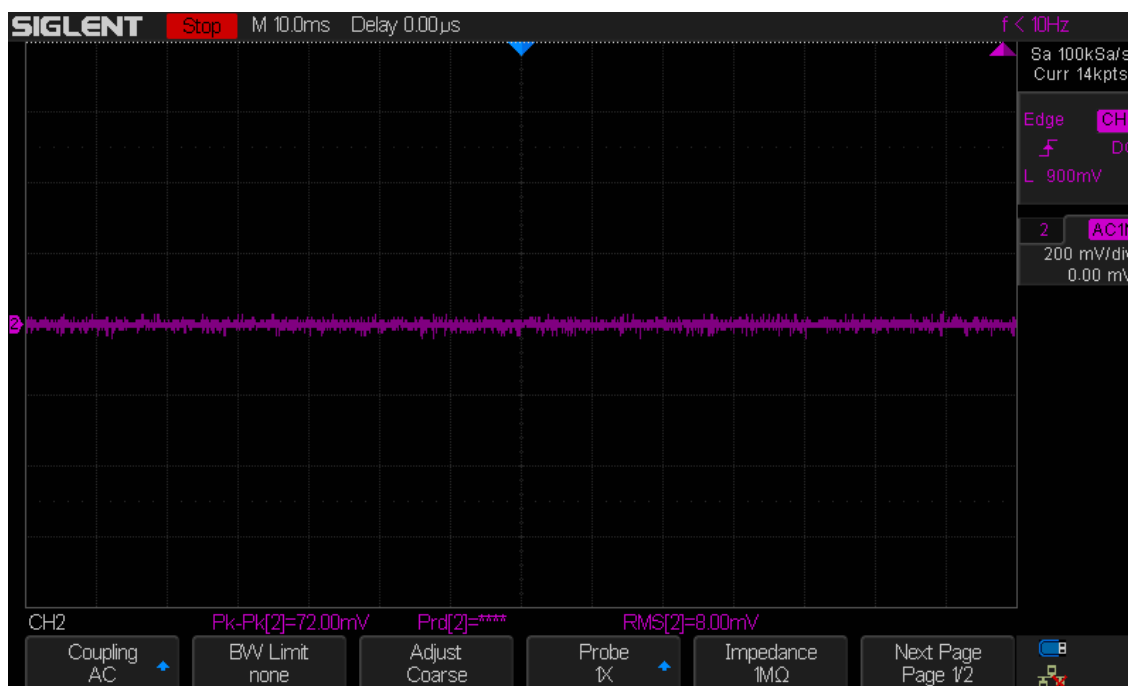
Obrázek 48.: Průběh výstupního zvlnění při  $U_{\text{výstupní}} = 10 \text{ V}$  a  $I_{\text{výstupní}} = 2 \text{ A}$ .



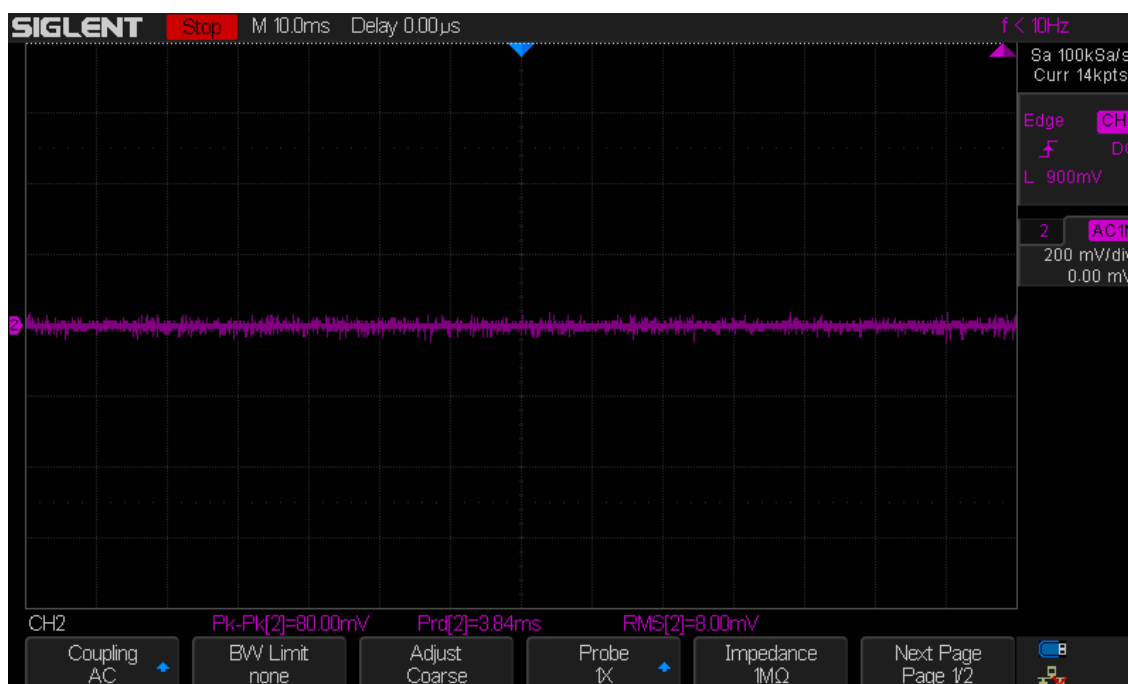
Obrázek 49.: Průběh výstupního zvlnění při  $U_{\text{výstupní}} = 10 \text{ V}$  a  $I_{\text{výstupní}} = 3 \text{ A}$ .



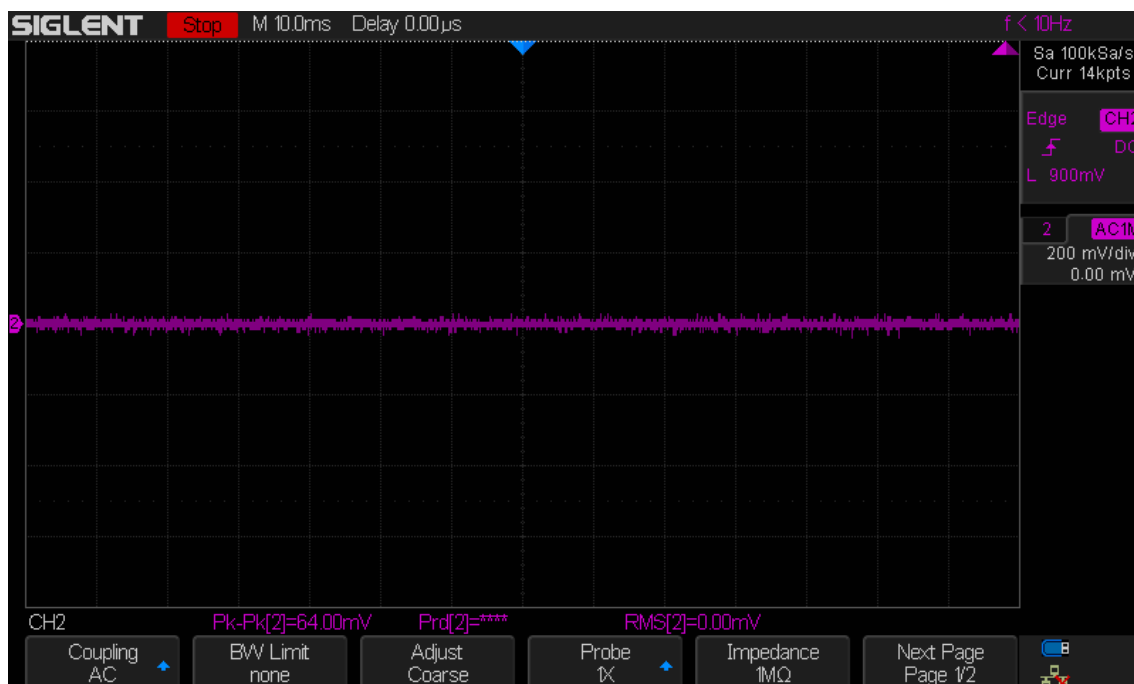
Obrázek 50.: Průběh výstupního zvlnění při  $U_{\text{výstupní}} = 20 \text{ V}$  a  $I_{\text{výstupní}} = 1 \text{ A}$ .



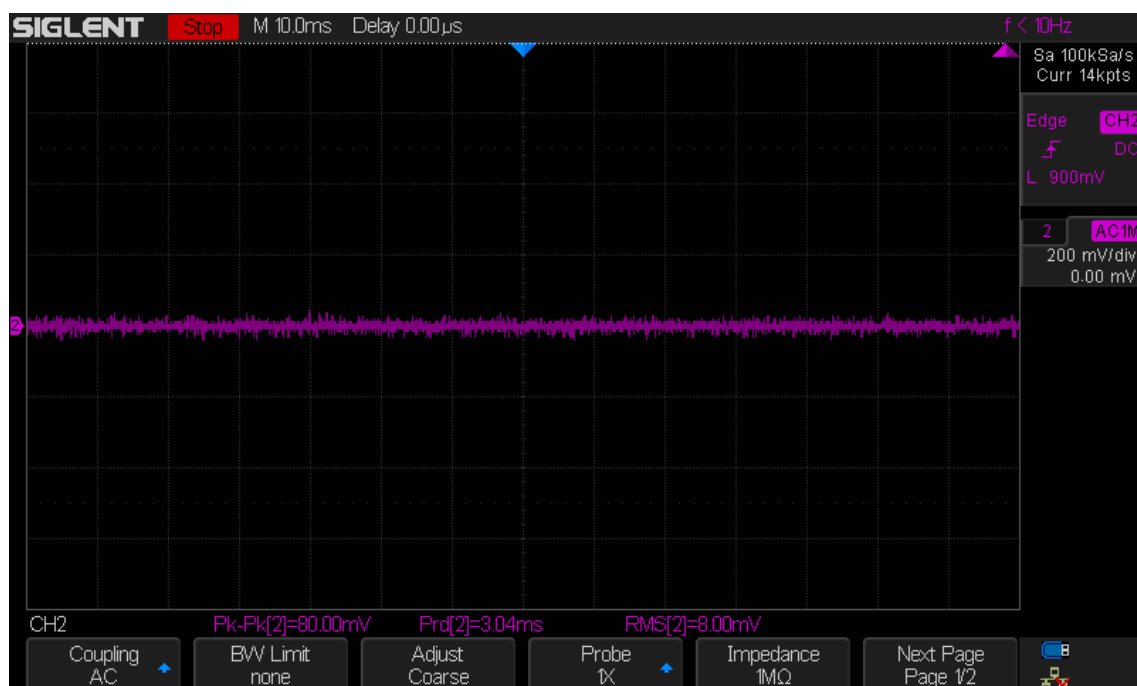
Obrázek 51.: Průběh výstupního zvlnění při  $U_{\text{výstupní}} = 20 \text{ V}$  a  $I_{\text{výstupní}} = 2 \text{ A}$ .



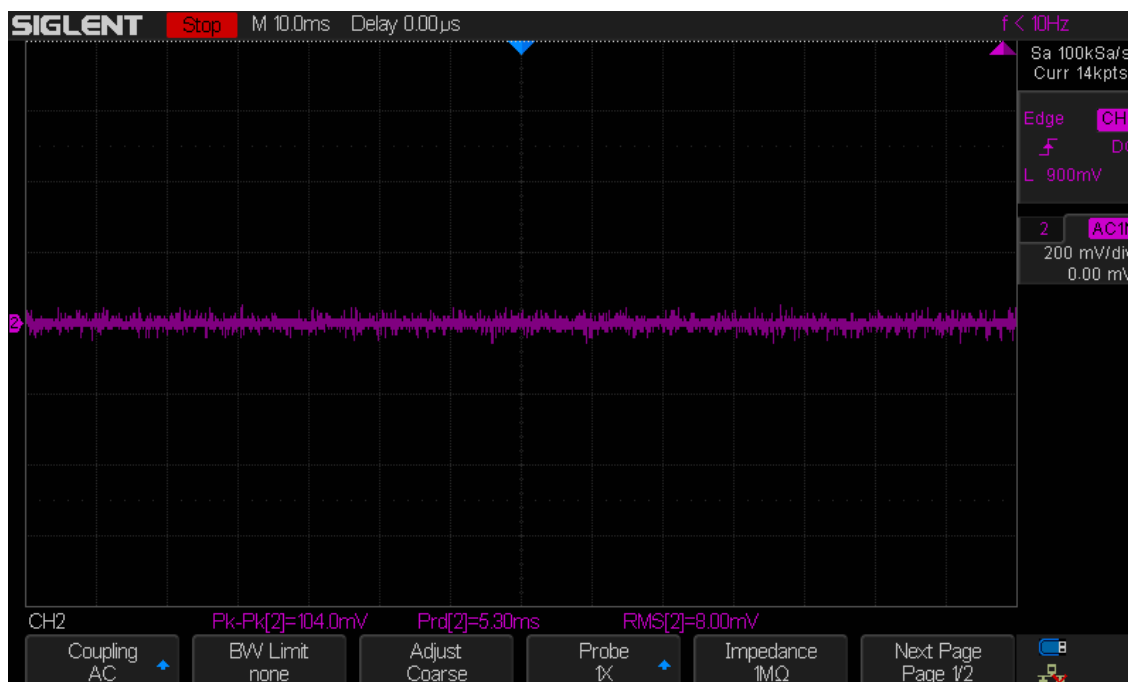
Obrázek 52.: Průběh výstupního zvlnění při  $U_{\text{výstupní}} = 20 \text{ V}$  a  $I_{\text{výstupní}} = 3 \text{ A}$ .



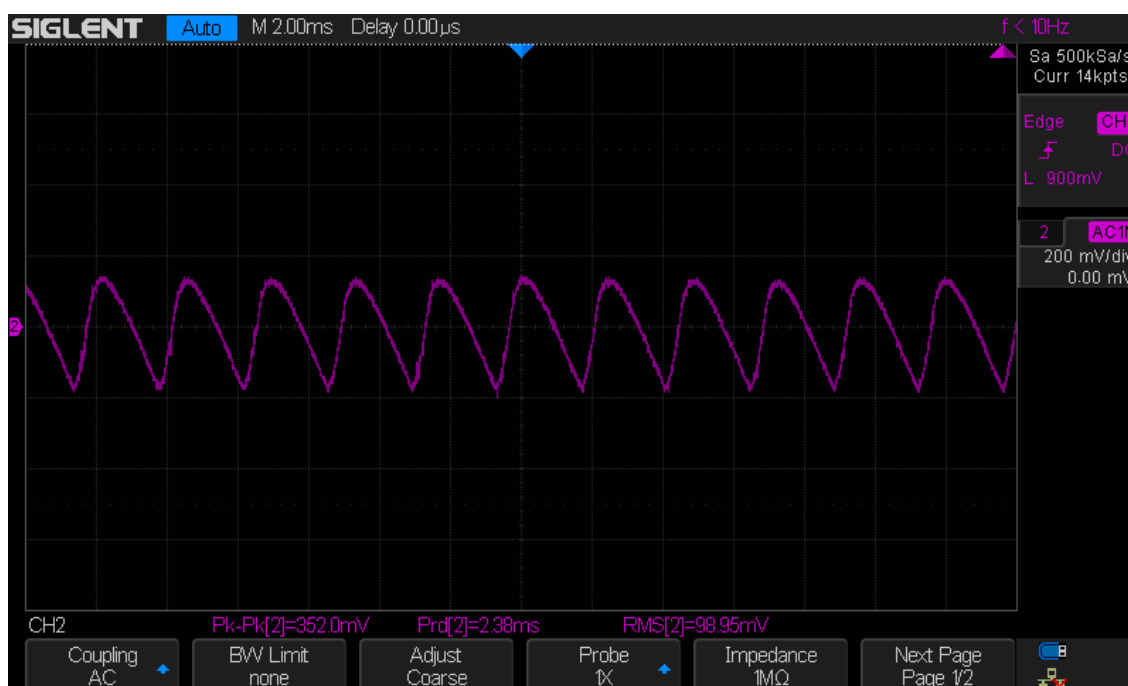
Obrázek 53.: Průběh výstupního zvlnění při  $U_{\text{výstupní}} = 30 \text{ V}$  a  $I_{\text{výstupní}} = 1 \text{ A}$ .



Obrázek 54.: Průběh výstupního zvlnění při  $U_{\text{výstupní}} = 30 \text{ V}$  a  $I_{\text{výstupní}} = 2 \text{ A}$ .

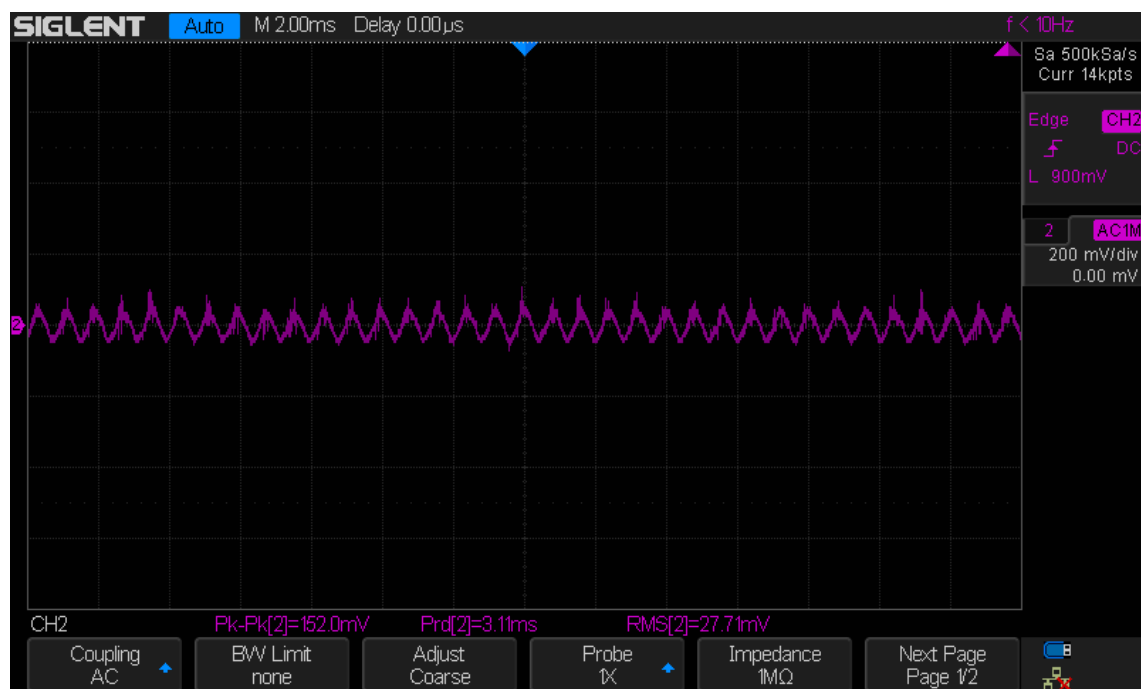


Obrázek 55.: Průběh výstupního zvlnění při  $U_{\text{výstupní}} = 30 \text{ V}$  a  $I_{\text{výstupní}} = 3 \text{ A}$ .



Obrázek 56.: Průběh výstupního zvlnění při proudovém omezení na  $1 \text{ A}$ .





Obrázek 57.: Průběh výstupního zvlnění při proudovém omezení na 2 A.

## IV. NAMĚŘENÉ HODNOTY

Tabulka 4.: Tabulka naměřených hodnot při měření zatěžovací charakteristiky

$U_{\text{vstupní}} = 34,72 \text{ V}$	$U_{\text{naprázdno}} = 10 \text{ V}$		$U_{\text{naprázdno}} = 20 \text{ V}$		$U_{\text{naprázdno}} = 30 \text{ V}$	
$I_{\text{výstupní}} [\text{A}]$	$U_{\text{výstupní}} [\text{V}]$	$R_i [\text{m}\Omega]$	$U_{\text{výstupní}} [\text{V}]$	$R_i [\text{m}\Omega]$	$U_{\text{výstupní}} [\text{V}]$	$R_i [\text{m}\Omega]$
0,00	10,000	-	20,000	-	30,000	-
0,10	9,989	110	19,988	120	29,984	160
0,20	9,980	100	19,979	105	29,970	150
0,30	9,973	90	19,969	103	29,961	130
0,40	9,967	82	19,960	100	29,948	130
0,50	9,960	80	19,941	118	29,938	124
0,60	9,947	88	19,937	105	29,928	120
0,70	9,939	87	19,929	101	29,917	119
0,80	9,926	92	19,919	101	29,905	119
0,90	9,918	91	19,908	102	29,895	117
1,00	9,905	95	19,898	102	29,885	115
1,10	9,894	96	19,881	108	29,872	116
1,20	9,884	97	19,876	103	29,862	115
1,30	9,875	96	19,862	106	29,851	115
1,40	9,866	96	19,857	102	29,837	116
1,50	9,854	97	19,846	103	29,826	116
1,60	9,843	98	19,837	102	29,815	116
1,70	9,837	96	19,828	101	29,806	114
1,80	9,826	97	19,814	103	29,792	116
1,90	9,816	97	19,802	104	29,781	115
2,00	9,806	97	19,794	103	29,769	116
2,10	9,791	100	19,779	105	29,755	117
2,20	9,782	99	19,771	104	29,745	116
2,30	9,771	100	19,763	103	29,733	116
2,40	9,766	98	19,752	103	29,721	116
2,50	9,758	97	19,739	104	29,711	116
2,60	9,745	98	19,728	105	29,697	117
2,70	9,733	99	19,715	106	29,683	117
2,80	9,725	98	19,702	106	29,668	119
2,90	9,717	98	19,697	104	29,660	117
3,00	9,703	99	19,684	105	29,647	118

Tabulka 5.: Tabulka naměřených hodnot účinnosti při výstupním napětí naprázdno 10 V

$U_{\text{vstupní}} [\text{V}]$	$I_{\text{vstupní}} [\text{A}]$	$U_{\text{výstupní}} [\text{V}]$	$I_{\text{výstupní}} [\text{A}]$	$P_{\text{vstupní}} [\text{W}]$	$P_{\text{výstupní}} [\text{W}]$	Účinnost $\eta$ [%]	$P_{\text{ztrátový}} [\text{W}]$
34,71	0,0651	10	0,00	2,260	0,0	0,00	2,26
34,68	0,1781	10	0,25	6,177	2,5	40,48	3,68
34,66	0,2802	10	0,50	9,712	5,0	51,48	4,71
34,64	0,3763	10	0,75	13,035	7,5	57,54	5,54
34,62	0,4778	10	1,00	16,541	10,0	60,45	6,54
34,59	0,5749	10	1,25	19,886	12,5	62,86	7,39
34,57	0,6746	10	1,50	23,321	15,0	64,32	8,32
34,55	0,7777	10	1,75	26,870	17,5	65,13	9,37
34,52	0,8723	10	2,00	30,112	20,0	66,42	10,11
34,50	0,9721	10	2,25	33,537	22,5	67,09	11,04
34,47	1,0886	10	2,50	37,524	25,0	66,62	12,52
34,45	1,1839	10	2,75	40,785	27,5	67,43	13,29
34,43	1,2910	10	3,00	44,449	30,0	67,49	14,45

Tabulka 6.: Tabulka naměřených hodnot účinnosti při výstupním napětí naprázdno 20 V

$U_{\text{vstupní}} [\text{V}]$	$I_{\text{vstupní}} [\text{A}]$	$U_{\text{výstupní}} [\text{V}]$	$I_{\text{výstupní}} [\text{A}]$	$P_{\text{vstupní}} [\text{W}]$	$P_{\text{výstupní}} [\text{W}]$	Účinnost $\eta$ [%]	$P_{\text{ztrátový}} [\text{W}]$
34,71	0,0676	20	0,00	2,346	0,0	0,00	2,35
34,67	0,2918	20	0,25	10,115	5	49,43	5,12
34,64	0,4307	20	0,50	14,919	10	67,03	4,92
34,61	0,6025	20	0,75	20,853	15	71,93	5,85
34,57	0,7688	20	1,00	26,577	20	75,25	6,58
34,54	0,9467	20	1,25	32,699	25	76,45	7,70
34,51	1,1342	20	1,50	39,141	30	76,65	9,14
34,47	1,2944	20	1,75	44,618	35	78,44	9,62
34,43	1,4927	20	2,00	51,394	40	77,83	11,39
34,41	1,6350	20	2,25	56,260	45	79,99	11,26
34,35	1,8571	20	2,50	63,791	50	78,38	13,79
34,32	2,0255	20	2,75	69,515	55	79,12	14,52
34,28	2,1913	20	3,00	75,118	60	79,87	15,12

Tabulka 7.: Tabulka naměřených hodnot účinnosti při výstupním napětí naprázdno 30 V

$U_{\text{vstupní}} [\text{V}]$	$I_{\text{vstupní}} [\text{A}]$	$U_{\text{výstupní}} [\text{V}]$	$I_{\text{výstupní}} [\text{A}]$	$P_{\text{vstupní}} [\text{W}]$	$P_{\text{výstupní}} [\text{W}]$	Účinnost $\eta$ [%]	$P_{\text{ztrátový}} [\text{W}]$
34,71	0,0709	30	0,00	2,461	0,0	0,00	2,46
34,67	0,3233	30	0,25	11,209	7,5	66,91	3,71
34,62	0,5629	30	0,50	19,488	15,0	76,97	4,49
34,57	0,8082	30	0,75	27,939	22,5	80,53	5,44
34,53	1,0692	30	1,00	36,919	30,0	81,26	6,92
34,48	1,2967	30	1,25	44,710	37,5	83,87	7,21
34,43	1,5516	30	1,50	53,422	45,0	84,24	8,42
34,39	1,7528	30	1,75	60,279	52,5	87,10	7,78
34,34	2,0475	30	2,00	70,311	60,0	85,33	10,31
34,29	2,3003	30	2,25	78,877	67,5	85,58	11,38
34,25	2,5390	30	2,50	86,961	75,0	86,25	11,96
34,20	2,8012	30	2,75	95,801	82,5	86,12	13,30
34,16	3,0470	30	3,00	104,086	90,0	86,47	14,09